

# Ein MBSE-Ansatz für die Auslegung von Flugzeugkabinen am Beispiel eines Passenger Service Channel

## Masterarbeit

im Fachgebiet *Systemanalyse Lufttransport*

Studiengang *Flugzeug-Systemtechnik*

der

Technischen Universität Hamburg

Institut für Lufttransportsysteme

**Mara Katharina Fuchs**

Matrikel- Nr.: 21156319

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Volker Gollnick

Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause

Betreuer: Dr.-Ing. Jörn Biedermann

Bearbeitungszeitraum: 17.06.2018 - 17.12.2018

Hamburg, 17. Dezember 2018

---



Die selbständige und eigenhändige Anfertigung  
versichere ich an Eides statt.

Hamburg, den 17. Dezember 2018

---

Unterschrift





# Kurzfassung

Das Institut für Lufttransportsysteme der TUHH folgt zusammen mit dem DLR mit seinen Leitkonzepten den Zielen der europäischen Luftfahrtstrategie für ein effizienteres, kostengünstigeres und sicheres Fliegen. Dabei wird bereits in der Entwurfsphase betrachtet, wie sich das Flugzeug und die Kabine in das Gesamtsystem Luftverkehr einfügt unter der Berücksichtigung des Faktors Mensch. Modelle und grafische Analysen können in der Vorentwicklung helfen, Konzepte für die Gestaltung der Flugzeugkabine effizienter zu entwickeln. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird daher der modellbasierte Lösungsansatz für die Flugzeugkabine anhand der Passagier Service Einheit untersucht.

Zuerst werden die Anforderungen sowie Vorschriften für die Auslegung von Kabinensystemen abgeleitet. Mit Hilfe des Model-based Systems Engineering Ansatzes und der objektorientierten Programmierung werden verschiedene Modelle zur Abbildung der vielfältigen funktionalen Eigenschaften beispielhaft an der PSU erstellt. Mit diesen werden dann verschiedene Konzepte zur optimalen Anordnung der PSU-Funktionen in der Kabine untersucht und anschließend nach ausgewählten Kriterien bewertet. Dabei liegt ein besonderer Fokus auf der Betrachtung des Humanfaktors und der Kosten für die Montage. Interpretation der Ergebnisse zeigt, dass eine Vormontage in Zusammenhang mit neuen Konzepten der PSU für eine Kostenreduzierung sorgt und dabei kaum Einbuße im Komfort beim Passagier darstellt. Der modellbasierte Ansatz zeigt dabei weite Vorteile bei der Entwicklung und ist auch zukünftig eine gute Methode zur Abbildung komplexer Systeme.

# Abstract

The Institute for Air Transportation Systems and the DLR's guiding principles are in line with the goals of the European aviation strategy for more efficient, cost-effective and safe-flight. The design phase already considers how the aircraft and the cabin are integrated into the overall system of air traffic, taking into account the human factor. It will show how models and grayscale analyzes can help to develop concepts for the design of the aircraft cabin more efficiently during the pre-development. Within the scope of this master thesis, the model-based solution approach for the aircraft cabin is examined by the passenger service unit.

First, requirements for the installation of computer systems will be derived. With the help of the Model-based Systems Engineering the programming of different models to illustrate the various functions of the PSU is created. These models will be used to select different concepts for adjusting the PSU functions in the cabin and then to

evaluate them according to selected criteria. These are specially the consideration of geometric gradations and the cost of assembly. Comparing the results, a pre-assembly is presented in the context of new concepts of the PSU for a cost reduction without a loss of comfort for the passenger. The interdisciplinary approach has advantages and provides a good method for developing and mapping complex systems.

# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Lufttransportsysteme der Technischen Universität Hamburg in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt am Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt.

Zunächst möchte ich Prof. Dr.-Ing. Volker Gollnick besonderen Dank für die Prüfung der Masterarbeit und die hilfreichen Anregungen aussprechen. Herrn Dipl.-Ing. Björn Nagel gilt mein herzlicher Dank für die Möglichkeit zur Durchführung dieser Arbeit. Ebenso möchte ich Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause für die Übernahme des Zweitprüfers danken. Ein großes Dankeschön an Dr.-Ing. Jörn Biedermann für die Betreuung meiner Masterarbeit und die wertvollen Tipps. An dieser Stelle möchte ich außerdem einen besonderen Dank an Dr.-Ing. Jörg Fuchte richten, der mir seit Beginn meiner Arbeit große Unterstützung zukommen ließ.

Meinen Arbeitskollegen danke ich für die angenehme Zusammenarbeit während meiner Masterarbeit. Die herzliche Aufnahme ins bestehende Team habe ich sehr geschätzt. Besonderer Dank gehen an Dr.-Ing. Veatriki Papantoni und Dr.-Ing. Christian Hesse, die immer ein offenes Ohr für mich hatten. Weiterhin möchte ich meinen Freunden für ihre Unterstützung danken - bei Catharina Burian, Niklas Wulf, Michael Nguyen und Pia-Marie Fuchs.

Meinen Eltern danke ich für die Möglichkeiten, die sie mir im Leben eröffnet haben und die bedingungslose Unterstützung meines Lebensweges. Nicht zuletzt danke ich aus ganzem Herzen meinem Freund Finn, der immer für mich da ist und mir bei all meinen Vorhaben unterstützend zur Seite steht.

Hamburg, Dezember 2018

Mara Katharina Fuchs



# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>V</b>
<b>Abstract</b>	<b>V</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>XII</b>
<b>Aufgabenstellung</b>	<b>XVI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Die Flugzeugkabine . . . . .	5
2.1.1 Systemgrenzen . . . . .	6
2.1.2 Elektrische Systemarchitektur . . . . .	7
2.1.3 Signalverarbeitung und Steuerung der digitalen Systeme . . . . .	8
2.2 Model-based Systems Engineerings . . . . .	11
2.3 Objektorientierte Programmierung . . . . .	14
<b>3 Stand der Technik</b>	<b>17</b>
3.1 Die Passenger Service Unit . . . . .	17
3.1.1 Zeitliche Entwicklung . . . . .	18
3.1.2 Heutige PSU-Designs . . . . .	19
3.2 Anforderungen an die Systemauslegung . . . . .	23
3.3 Anwendungsfälle der PSU-Funktionen . . . . .	25
3.4 Modellbasierte Lösungsansätze im Flugzeugvorentwurf . . . . .	31

<b>4</b>	<b>Modellbasierte Auslegung von PSU-Funktionen</b>	<b>35</b>
4.1	Modellbasierter Ansatz . . . . .	35
4.2	Modell Mensch . . . . .	37
4.2.1	Geometrische Abhängigkeiten zwischen Mensch und PSU . . .	38
4.2.2	Aufstellen der Zielfunktion . . . . .	44
4.3	Montagekostenmodell . . . . .	45
4.4	Klassenbasierter Ansatz in MATLAB <sup>®</sup> . . . . .	47
4.4.1	Kabinengeometriemodell . . . . .	48
4.4.2	Ontologiemodell . . . . .	52
4.4.3	Funktionalitätenmodell . . . . .	53
4.4.4	Anforderungsmodell . . . . .	54
4.5	Regelbasierte Anordnung der PSU-Funktionen . . . . .	55
<b>5</b>	<b>Kabinenentwurfsstudie</b>	<b>59</b>
5.1	Kabinenszenarien . . . . .	59
5.1.1	Annahmen für die Auslegung der Kabine . . . . .	60
5.1.2	Referenzszenario . . . . .	62
5.1.3	Szenario 1: Neue Gepäckablage . . . . .	64
5.1.4	Szenario 2: LBin, vormontierbar - gekürzt . . . . .	65
5.1.5	Szenario 3: LBin, vormontierbar, zwei PSCs . . . . .	66
5.2	Auswertung der Zielfunktionen . . . . .	67
5.2.1	Ergebnisse Passagierkomfort . . . . .	69
5.2.2	Ergebnisse Montagekostenmodell . . . . .	73
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>77</b>
6.1	Bewertung der Ergebnisse . . . . .	77
6.2	Diskussion des modellbasierten Entwurfsansatzes . . . . .	79
6.3	Diskussion des objektorientierten Ansatzes für die Kabinengestaltung	81
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>85</b>

---

<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>87</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>93</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>97</b>
<b>A Anhang</b>	<b>99</b>
A.1 Programmcode . . . . .	99
A.2 Flugzeugmodell . . . . .	102
A.3 Annahmen für die Auslegung der PSU . . . . .	104
A.4 Ergebnisse der geometrischen Bewertung . . . . .	105
A.5 Funktionalitätenmodell . . . . .	107





# Nomenklatur

## Lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$a$	$[mm]$	Abstand
$A$	$[dB/m]$	Schalldruckpegelabnahme
$d_0$	$[mm]$	Durchmesser
$D$	$[inch]$	Diagonale
$h$	$[mm]$	Höhe
$m_G$	$[mm]$	Griffweite des Menschen
$n_S$	$[-]$	Anzahl der Sitze
$N$	$[\%]$	Non-Adding Value
$S$	$[-]$	Sicherheitsfaktor
$t$	$[IM]$	Bearbeitungszeit
$v$	$[m/s]$	Luftgeschwindigkeit
$v_0$	$[m/s]$	Luftaustrittsgeschwindigkeit
$x, y, z$	$[mm]$	kartesische Koordinaten
$z_{Lp}$	$[dB]$	Schalldruckpegelzunahme
$Z$	$[-]$	Zielfunktion

## Kennzahlen

Symbol	Definition	Bezeichnung
$L_p$	$20 \log_{10} \frac{\tilde{p}}{p_0}$	Schalldruckpegel
$inch$	$1 \text{ inch} = 0,0254 \text{ m}$	Zoll, Maßeinheit
$IM$	$100 \text{ IM} = 1 \text{ h}$	Industrieminute

## Indizes

<b>Symbol</b>	<b>Bezeichnung</b>
<i>a</i>	Anschluss
<i>A</i>	Akustik der Lautsprecher
<i>B</i>	Beleuchtung
<i>erf</i>	erforderlich
<i>f</i>	Fillerpanel
<i>F</i>	Flugbegleiterruf
<i>ges</i>	gesamt
<i>i</i>	Variable
<i>I</i>	In-Flight Entertainment Bildschirme
<i>kenn</i>	Kennwert
<i>K</i>	Kosten
<i>L</i>	Belüftung
<i>max</i>	maximal
<i>min</i>	minimal
<i>N</i>	Normwert
<i>p</i>	PSU
<i>S</i>	Sauerstoffmasken
<i>SS</i>	Störgeräusche
<i>T</i>	Transport
<i>Z</i>	Hinweiszeichen

## Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Bezeichnung</b>
ACARE	Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe
APU	Auxiliary Power Unit
CAD	Computer-aided Design
CBP	Circuit Breaker Panel
CIDS	Cabin Intercommunication Data System
CMS	Cabin Management System
CPACS	Common Parametric Aircraft Configuration Schema
CS-25	Certification Specification for Large Aeroplanes
DEU	Decoder-Encoder-Unit
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DOC	Direct Operating Costs
EASA	European Aviation Safety Agency

<b>Abkürzung</b>	<b>Bezeichnung</b>
FAL	Final Assembly Line
FAP	Flight Attendant Panel
IFE	In-flight Entertainment
ILT	Institut für Lufttransportsysteme
INCOSE	International Council of Systems Engineering
KBE	Knowledge-based Engineering
LED	Light-Emitting Diode
MBSE	Model-based Systems Engineering
MDO	Multidisciplinary Design Optimization
MTOW	Maximum Take Off Weight
NVA	Non-Value Adding
OEM	Original Equipment Manufacturer
OHSC	Overhead Stowage Compartment
PadLab	Preliminary Aircraft Design Laboratory
PED	Portable Electronic Device
PEPDC	Primary Electrical Power Distribution Center
PSC	Passenger Service Channel
PSU	Passenger Service Unit
PTP	Programming and Test Panel
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics
SE	Systems Engineering
SRP	Seat Reference Point
STL	Standard Triangulation Language
TUHH	Technische Universität Hamburg
UML	Unified Modeling Language
VR	Virtual Reality
WLAN	Wireless Local Area Network
ZAL	Zentrum für Angewandte Luftfahrtforschung GmbH

## Masterarbeit

Für: Mara Fuchs, Matrikelnr. 21156319

Thema: Ein MBSE-Ansatz für die Auslegung  
von Flugzeugkabinen am Beispiel eines  
Passenger Service Channel

Prof. Dr.-Ing. Volker Gollnick

TU Hamburg  
Blohmstr. 20  
21079 Hamburg  
Deutschland

Tel +49-40-42878-4197

Fax +49-40-42878-2979

volker.gollnick@dlr.de

<http://cgi.tu-harburg.de/~iltwww/>

### 1) HINTERGRUND

Neben der Bereitstellung eines Sitzplatzes und notwendiger Service-Einrichtungen, werden in einer Kabine weitere Service-Elemente dem Passagier bereitgestellt. Diese sind zum Teil gesetzlich vorgeschrieben (Sauerstoff), zum erheblichen Teil aber freie Angebote (Leselicht). Hieraus ergeben sich u.a. unterschiedliche Qualifikationsanforderungen. Zudem bieten neue Technologien nicht nur die Möglichkeit etablierte Funktionen in bestimmten Kabinenbereichen anders zu realisieren, sondern auch neue Service-Angebote zu schaffen. Neue Displaytechnologien, kontaktlose Kommunikationsschnittstellen oder Kartenlesefunktionen sind hierfür Beispiele. Model-Based-System-Engineering-Ansätze (MBSE) sind grundsätzlich gut geeignet, derartig diverse funktionale Elemente und Lösungen in einer geeigneten Systematik im Auslegungsprozeß abzubilden.

Im Rahmen der Masterarbeit soll eine Methodik zur strukturierten und modularen Anordnung dieser Funktionen einer Flugzeugkabine entwickelt werden. Hierbei soll grundsätzlich für die Auslegung einer Kabine untersucht werden, ob ein objektorientierter, klassenbasierter Designansatz möglich ist. Dieses ist im Detail an einer Passenger-Service-Unit (PSU) zu beleuchten. Dabei ist auch zu berücksichtigen, daß ein Bauteil/Baugruppe mechanische, elektrische und drahtlose Schnittstellen sowohl als Benutzer-Frontend als auch zur Installation aufweist. Diese vielfältigen funktionalen Eigenschaften sind repräsentativ am Beispiel PSU zu behandeln.

Weiter soll auf Basis der erzeugten Daten eine Darstellung und Bewertung verschiedener Lösungsansätze durchgeführt werden. Die Arbeit erfolgt in Kooperation und mit Unterstützung des DLR-Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt und Diehl Aviation.

### 2) AUFGABE

Im Einzelnen soll eine Methodik für die Auslegung der PSU/PSC-Funktionen abhängig von der Passagierkabinenkonfiguration gefunden werden und folgende Arbeitsschritte umfassen:


- Recherche bzgl. der Wechselwirkungen der PSU zwischen Rumpf- bzw. Kabinengeometrie und anderen Kabinensystemen
- Entwicklung eines objektorientierten und klassenbasierten Ansatzes zur Abbildung einer Flugzeugkabine sowie Fokussierung auf die Baugruppe PSU
- Erstellen eines Geometriemodells in hinreichender Genauigkeit für die Analysen und einer Auslegungssystematik, welche Kern-Elemente der PSU in Abhängigkeit des Passagierlayouts platziert
- Formulierung und Begründung von notwendigen Anforderungen und Vorschriften für die Auslegung von Kabinensystemen
- Darstellung und Diskussion des erarbeiteten methodischen Entwurfsansatzes
- Darstellung und Bewertung der Konzepte zur Anordnung der PSU-Funktionen
- Dokumentation

Beginn der Arbeit: sofort  
 Ende der Arbeit: 14.12.2018  
 Interner Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Volker Gollnick  
 Externer Betreuer: Dr.-Ing. Jörn Biedermann  
 Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Volker Gollnick

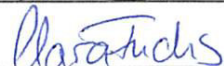
Datum, Unterschrift Prüfer:

20.6.18 

Datum, Unterschrift Externer Betreuer:

28.6.2018 

Datum, Unterschrift Student:

28.6.2018 



# 1. Einleitung

Flugzeughersteller stehen vor der Herausforderung einer zunehmenden Systemkomplexität ihrer Produkte aufgrund des Einsatzes neuer Technologien, um die Ziele der ACARE an einen effizienteren und nachhaltigeren Flugverkehr zu erreichen [1]. Dadurch ist ein Zusammenwirken vieler Spezialisten verschiedener Fachdisziplinen erforderlich. Hierbei können neue Produktentwicklungsmethoden, wie das Model-based Systems Engineering, bei der disziplinübergreifenden Systemauslegung unterstützen. Durch die Anwendung wissensbasierter Methoden und Modelle, können komplexe Systeme und deren Vernetzung untereinander einfacher verstanden werden.

Das Institut für Lufttransportsysteme der Technischen Universität Hamburg forscht zusammen mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt an neuen und innovativen Methoden für eine ganzheitliche Betrachtung der Kabine im Vorentwurf. Abbildung 1.1 zeigt einen Teil der verschiedenen Schritte im Flugzeugvorentwurf. Dabei werden zuerst die Anforderungen an das zu entwerfende Flugzeug, wie z.B. die Reichweite oder Nutzlast, festgelegt. Aufbauend auf diesen werden in den nächsten

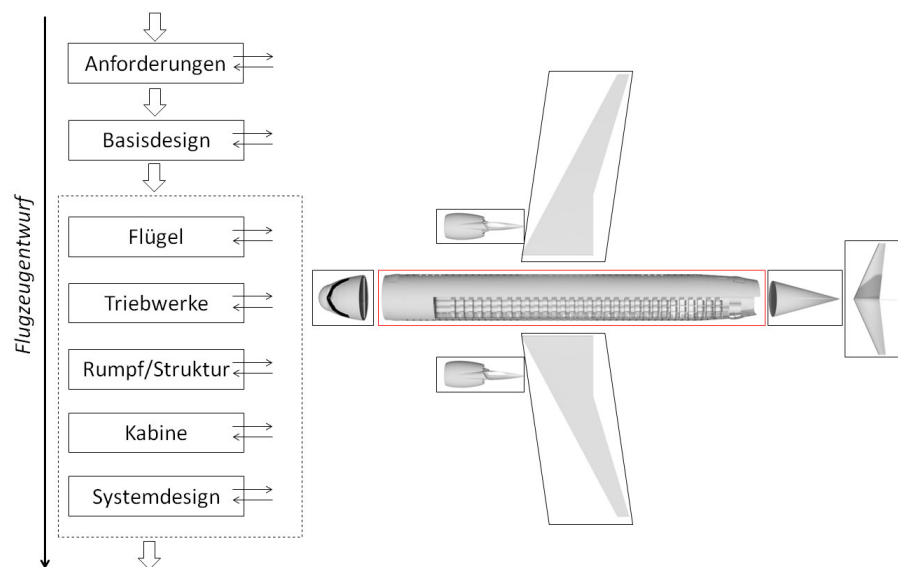


Abbildung 1.1: Systeme und Abgrenzung im Flugzeugvorentwurf nach [2]

Schritten die konzeptionellen Designs der verschiedenen Systeme des Flugzeugs entwickelt und ausgelegt. Dazu gehören unter anderem die Auslegung des Antriebssystems, des Rumpfes und der Kabine sowie der Flügel, des Hecks, der Höhen- und Seitenruder. Dabei kommt es zu Wechselwirkungen zwischen den Systemen, sodass diese sich gegenseitig bei der Auslegung beeinflussen und abhängige Parameter aufweisen.

In dieser Arbeit wird der modellbasierte Ansatz für die Flugzeugkabine näher betrachtet und die strukturellen Grundlagen für dessen Auslegung modelliert. Abbildung 1.2 zeigt die Zuordnung der einzelnen Komponenten zu den Teilbereichen der Kabine. Dabei wird zwischen der Ausstattung und den Systemen unterschieden. Neben der Bereitstellung eines Sitzplatzes und notwendiger Service-Einrichtungen (Toiletten), werden in einer Kabine weitere Service-Elemente dem Passagier angeboten. Diese befinden sich in der Passagier Service Einheit (engl.: *Passenger Service Unit*, PSU). Dazu gehören die zum Teil gesetzlich vorgeschriebenen Komponenten (z.B. Sauerstoffmasken), aber auch zum erheblichen Teil freie Angebote (z.B. Leselichter). Hier bietet die PSU die Möglichkeit für den Flugzeugbetreiber spezifische Modifikationen einzubauen und dadurch neue Einnahmequellen zu schaffen.

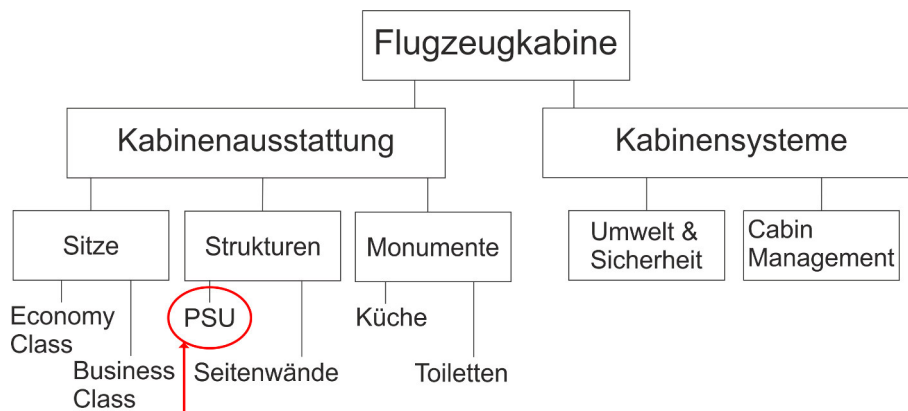


Abbildung 1.2: Einordnung der Passagier Service Einheit innerhalb der Flugzeugkabine nach [3]

Mit Hilfe des MBSE-Ansatzes wird eine Methodik zur strukturierten und modularen Anordnung der PSU entwickelt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein Bauteil/Baugruppe mechanische, elektrische und drahtlose Schnittstellen sowohl als Benutzer-Frontend als auch zur Installation aufweist. Diese vielfältigen funktionalen Eigenschaften können durch Modelle mit spezifizierten Ein- und Ausgängen abgebildet werden. Diese ermöglichen, die Passagier Service Funktionen mit verschiedenen Platzierungskonzepten zu simulieren und anschließend zu bewerten, wobei die Anforderungen an den Passagierkomfort und einer möglichen Vormontage im Vordergrund stehen. Dadurch kann eine Bewertung von Kabinenkonzepten bereits in der Entwicklungsphase durchgeführt und der Faktor Mensch berücksichtigt werden. Das



---

Gesamtsystem der Passagier Service Einheit kann daher durch eine Vernetzung verschiedener Modelle erfasst werden und darüber hinaus die Schnittstellen sowie Wechselwirkungen innerhalb der Flugzeugkabine aufzeigen.

## Aufbau und Ziel der Arbeit

Zielsetzung der Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik für die Auslegung der PSC-Funktionen abhängig von der Passagierkabinenkonfiguration. Dafür werden zuerst die Wechselwirkungen der PSU zwischen Rumpf bzw. Kabine und anderen Kabinensystemen ermittelt. Die Entwicklung eines objektorientierten Ansatzes zur Abbildung einer Flugzeugkabine mit der Fokussierung auf die Baugruppe der PSU dient zur Beurteilung verschiedener Konzepte. Daraus werden verschiedene Modelle abgeleitet und diese für die Analyse und Bewertung unter diversen Gesichtspunkten verwendet. Anschließend wird der erarbeitete methodische Entwurfsansatz diskutiert.

Zu Beginn werden in Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen zu der Flugzeugkabine erläutert und die einzelnen Systeme vorgestellt. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Auslegung einer Kabine vom Flugzeugtyp einer AIRBUS A320.

In Kapitel 3 wird der Aufbau und die verschiedenen Funktionen sowie die Anforderungen an die Auslegung eines Passenger Service Channels (PSC) beschrieben. Zudem werden deren Wechselwirkungen mit weiteren Systemen in der Flugzeugkabine und die Interaktion mit dem Passagier in Anwendungsfällen dargestellt.

Die entsprechende Methodik zur geometrischen Anordnung der PSC-Funktionen innerhalb der Kabine wird in Kapitel 4 erstellt. Dies erfolgt mit Hilfe der objektorientierten Programmierung. Daraus leiten sich einige Modelle ab, die zusammen das System der PSU und die strukturellen Grundlagen der Kabine darstellen. Zusätzlich werden die Annahmen für das Montagekostenmodell und das Modell des Menschen vorgestellt, auf denen aufbauend die Bewertung neuer Kabinenszenarien stattfindet.

Die Vorstellung und Bewertung neuer Szenarien sind in Kapitel 5 vorzufinden. Dabei geben die erstellten Modelle eine hinreichend genaue Aussage über die Bewertung des Passagierkomforts der einzelnen Konzepte wieder und stellt diese grafisch dar. Des Weiteren werden die Ergebnisse des Kostenmodells vorgestellt.

Kapitel 6 zeigt die Diskussion über die Anwendung eines methodischen Entwurfsansatzes und des objektorientierten Lösungsansatzes für die Kabinengestaltung. Zusätzlich werden besondere Merkmale und Anwendungsmöglichkeiten der Programmierung vorgestellt.

Eine Zusammenfassung der Arbeit ist in Kapitel 7 zu finden. Zudem wird ein Ausblick auf zukünftige weiterführende Arbeiten im Zusammenhang mit dem objektorientierten Programmieren für die Auslegung der Systeme einer Flugzeugkabine gegeben.

## 2. Grundlagen

Im folgenden Kapitel wird auf den Aufbau der Flugzeugkabine, deren Aufgabe und Systeme genauer eingegangen. Für eine Bewertung neuer Konzepte in der Kabine und die Herangehensweise eines modellbasierten Ansatzes, müssen zuerst die gegebenen Systeme analysiert und beschrieben werden. Zudem wird auf die Grundlagen des Model-based Systems Engineering eingegangen.

### 2.1 Die Flugzeugkabine

Seit Beginn der Luftfahrt hat sich die Flugzeugkabine stark gewandelt. Vom einfachen Transportmittel hin zu einem komfortablen Reisemittel, das entsprechend der heutigen Zeit moderner und bequemer geworden ist. Die Tendenz geht in die Richtung einer vollelektronischen Kabine mit vielen zusätzlichen Funktionen für den Passagier und umfangreicheren Informationen zum Flugbetrieb [4]. Dadurch können zusätzliche Einnahmequellen im Service für die Fluggesellschaft geschaffen werden. Um auch zukünftig neue innovative Ideen in der Flugzeugkabine umsetzen zu können, müssen sich die Konzepte an ökonomischen und ökologischen Anforderungen sowie der technischen Realisierung in der Kabine orientieren.

Model-based Systems Engineering bietet Möglichkeiten, komplexe Systeme zu entwickeln und Wechselwirkungen mit anderen Schnittstellen innerhalb der Kabine darzustellen. In dieser Arbeit wird der modellbasierte Lösungsansatz daher als unterstützende Methodik für die Auslegung der Kabine am Beispiel der PSU angewandt und trägt mittels Modellen zum Verständnis der komplexen Zusammenhänge bei. Dafür werden zunächst die Grundlagen einer Flugzeugkabine betrachtet, die Systemgrenzen definiert und die notwendigen Schnittstellen für die Auslegung der Passagier Service Einheit ermittelt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Aufbau einer AIRBUS A320 als Flugzeugmuster verwendet. Diese Single-Aisle Konfiguration (zentraler Gang) gehört zu den meist verkauften Flugzeugentypen weltweit [4, 5]. Dadurch eignet sich dieser Flugzeugtyp

als Basismodell für die Untersuchungen eines modellbasierten Ansatzes. Die folgenden Eigenschaften bzgl. des Aufbaus einer Kabine, der elektrischen Versorgung und der digitalen Kommunikation beziehen sich daher direkt auf die A320.

### 2.1.1 Systemgrenzen

Die Kabine und der Flugzeugrumpf sind Hauptbaugruppen eines Flugzeugs. Deren Aufgabe es ist, Personen und Güter zu befördern. Um eine Abgrenzung zwischen den beiden Begriffen durchzuführen, müssen die Systemgrenzen für die Betrachtung in der vorliegenden Arbeit definiert werden. Der Flugzeugrumpf umfasst alle Primärstrukturen und Systeme, die den Rumpf aufbauen und tragen, sowie für das sichere Fliegen notwendig sind. Die Kabine hingegen umfasst alle Baugruppen, die mit der Innenverkleidung (Sekundärstruktur) beginnen und erstreckt sich bis hin zu allen Systemen, die für den Betrieb der Kabine notwendig sind. [6]

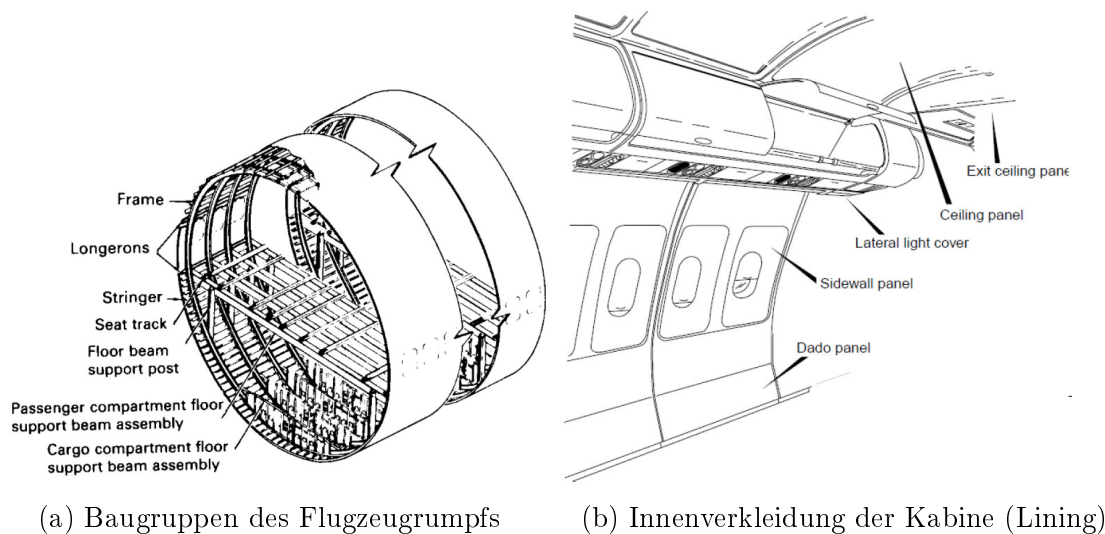


Abbildung 2.1: Aufbau des Flugzeugrumpfs und der Kabine [7]

Abbildung 2.1a zeigt den schematischen Aufbau eines Flugzeugrumpfs. Die Aufgabe des Rumpfs ist es, Volumen für Passagiere und Fracht bereitzustellen, einen Schutz vor klimatischen Bedingungen zu schaffen und den Großteil der Flugzeugsysteme aufzunehmen. Der Rumpf fungiert daher als Bindeglied zwischen allen Baugruppen des Flugzeugs, sodass hohe Anforderungen an die Steifigkeit und Festigkeit gestellt werden. Der Rumpfaufbau besteht daher aus mehreren Spanten, die eine Kompensation der Querkräfte vornehmen, sowie für die Formhaltung und Beul-Stabilität zuständig sind. Zwischen den Spanten sorgen Stringer für eine weitere Beul-Stabilität und leiten die Längskräfte in die Struktur des Rumpfs. Die Rumpfhaut nimmt hingegen die auftretenden Querkräfte, Drücke, Biege- und Torsionsmomente auf. Mehrere Querbalken dienen als Stabilisatoren und tragen die tatsächliche Nutzlast

des Haupt- und Unterdecks. Auf ihnen wird der Fußboden mit den Sitzschienen für die Platzierung der Sitze und der Serviceeinrichtungen in der Kabine angebracht. Weitere Baugruppen sind die Tür- und Fensterstrukturen sowie die Seitenwände. [6]

Die wesentliche Arbeitsaufgabe des Systems Flugzeugkabine ist die Unterbringung von Passagieren. Die Kabine dient dazu, dem Menschen eine angenehme und zugleich sichere Umgebung auf Reiseflughöhe zu bieten. Die meisten Passagiere erwarten zudem Komfort, Unterhaltung, Stauraum und Verpflegung. In Notsituationen und bei Unfällen muss zudem gewährleistet sein, dass Menschenleben geschützt werden. Zu der Kabine gehören die Baugruppen der Sitze, Serviceeinrichtungen, Kabinensysteme, Gepäckablagen (engl.: *Overhead Stowage Compartment*, OHSC) und der Verkleidung. Die Serviceeinrichtungen unterteilen sich in die Küchen, Toiletten und die Passagier Service Einheiten. Abbildung 2.1b zeigt einen Ausschnitt einer Flugzeugkabine mit den verschiedenen Elementen der Innenverkleidung (engl.: *Lining*). Zu diesen gehören das Dado-Panel, die Seitenpanels sowie die Deckenplatten. Diese verdecken die gesamte Struktur des Rumpfes sowie die Installationen von Kabeln und Anschlüssen. Neben der Aufgabe als Verkleidung oder Dekor der Rumpfwände dient das Lining als Dämmung. Es dämpft die Außengeräusche, die durch die Triebwerke des Flugzeuges entstehen, und dämmt den Innenraum vor den Temperatureinflüssen der Umgebung. Zudem erzeugt das Lining eine attraktive Kabinenumgebung und muss dabei keine wichtigen externen Lasten tragen. [7]

### 2.1.2 Elektrische Systemarchitektur

Ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt bei der Auslegung der Flugzeugkabine stellt die elektrische Versorgung der Kabinensysteme dar. Dazu gehört die Stromversorgung der Passagier Service Einheit. Im Folgenden wird daher die elektrische Systemarchitektur anhand der A320 Familie dargestellt. Aus dieser lassen sich Anforderungen an die Auslegung einzelner Bauteile sowie Schnittstellen zur PSU ableiten.

Abbildung 2.2 zeigt den schematischen Aufbau der zentralisierten Leistungsverteilung einer A320. Dabei wird eine zweistufige Leistungsschalterpanelstruktur verwendet, eine im vorderen und eine im hinteren Bereich des Flugzeugs. Als Hauptversorgungsquelle im Normalfall erzeugen zwei Wechselstromgeneratoren an den Triebwerken (gelbe Kreise) die benötigte elektrische Leistung [8]. Der Strom wird von dieser oder dem Hilfstriebwerk (engl.: *Auxiliary Power Unit*, APU) bereitgestellt und über Kabel an die Zentraleinheit der Hauptstromversorgung (engl.: *Main Power Bay*) in der Flugzeugnase geliefert. Dieser Verteilungspunkt wird auch als Primary Electrical Power Distribution Center (PEPDC) bezeichnet (grüne Box). Von dort wird die Leistung an alle Nutzer im Kabinen- und Cargobereich bereitgestellt. Zusätzlich sind zum Schutz der angeschlossenen Systeme gegen Überlast Schutzschalter

(engl.: *Circuit Breaker Panel*, CBP) zwischengeschaltet (graue Box). Bei der A320 wird für den Betrieb der Systeme Wechselstrom generiert. Ein Teil dieser Leistung wird dann für bestimmte Anwendungen in Gleichstrom umgewandelt. Die Kabinen- und Frachtladungen in herkömmlichen Flugzeugen werden aufgrund des geringen Systemgewichts und der hohen Belastbarkeit der Kabelquerschnitte mit 115 VAC mit konstanter Frequenz von 400 Hz und 28 VDC versorgt. [9, 10]

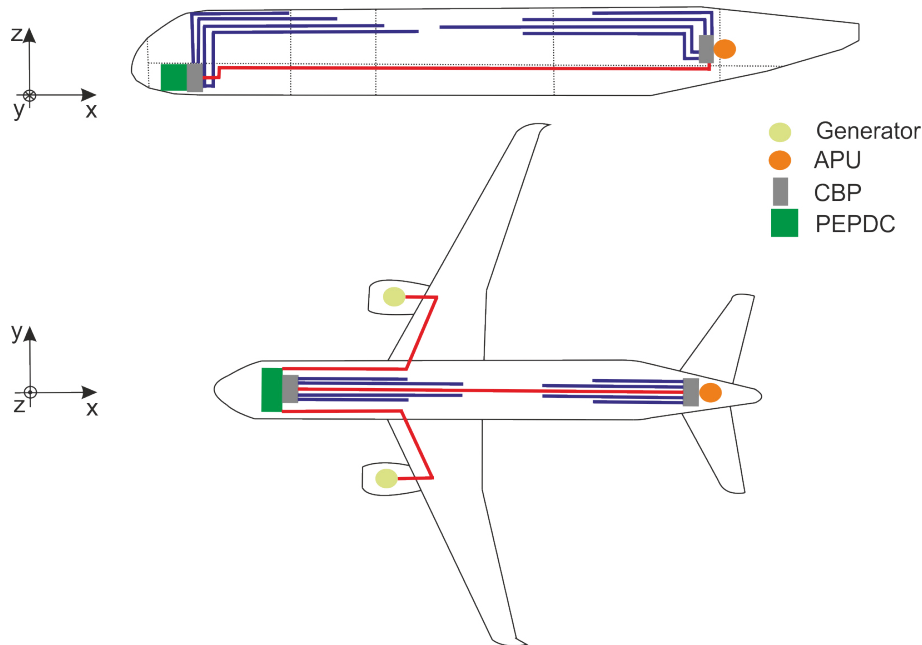


Abbildung 2.2: Zentralisierte elektrische Leistungsverteilung in einer A320 nach [9]

Ein wichtiger Auslegungsgesichtspunkt für das elektrische Energiesystem ist die Anzahl der Verbraucher und die benötigte Leistung zu dessen Betrieb. Betrachtung des elektrischen Lastprofils einer A320 nach [9] zeigt, dass ein Großteil der benötigten Leistung für das Kabinenequipment verwendet wird. Bei Reiseflugbedingungen an einem kalten Tag beträgt die benötigte elektrische Leistung rund 85 kVA. Zu den Hauptverbrauchern gehört der Betrieb der Küchen (engl.: *Galleys*) und der Toiletten. Der Verbrauch der Leselichter und der Kabinenbeleuchtung machen lediglich 15 kVA und damit 5 % des Gesamtverbrauchs aus [11, 10]. Der Betrieb der Passagier Service Funktionen macht daher nur einen kleinen Teil des benötigten Leistungsbedarfs während einer Flugmission aus.

### 2.1.3 Signalverarbeitung und Steuerung der digitalen Systeme

Als zentrale, digitale Steuereinheit in allen Verkehrsflugzeugen ist das Kabinenmanagementsystem (engl.: *Cabin Management System*, CMS) eingebaut und stellt eine

weitere Schnittstelle bei der Betrachtung der PSU dar. Dieses steuert die Funktionen in der Kabine und zeigt Parameter für Passagiere und Besatzung an. Dazu gehören unter anderem die Kabinenbeleuchtung, -temperatur und diverse andere Kabinenfunktionen, die teilweise von sicherheitsrelevanter Bedeutung sind. Besonders die Kabinendurchsagen, Notsignale und Hinweiszeichen sind im Hinblick auf das Zusammenspiel mit der PSU zu betrachten.

In Abbildung 2.3 ist der Aufbau eines Kabinenmanagementsystems von AIRBUS dargestellt, auch Cabin Intercommunication Data System (CIDS) genannt und wird im weiteren als Namensbegriff verwendet. Das System testet, überwacht und kontrolliert diverse Kabinensysteme. Das CIDS besteht unter anderem aus einem Zentralcomputer (Direktor), dessen Interface Board, einem Datennetzwerk zur Audioübertragung in der Kabine und einem oder mehreren Flugbegleiter-Panelen (engl.: *Flight Attendant Panels*, FAP). Die vier Kernaufgaben des CIDS lassen sich in Kommunikation, Anzeige, Steuerung und Parametrisierung unterteilen. Durch flexible Programmierung kann das Kabinenmanagementsystem individuell an die Vorgaben der Fluggesellschaft angepasst werden. [12]

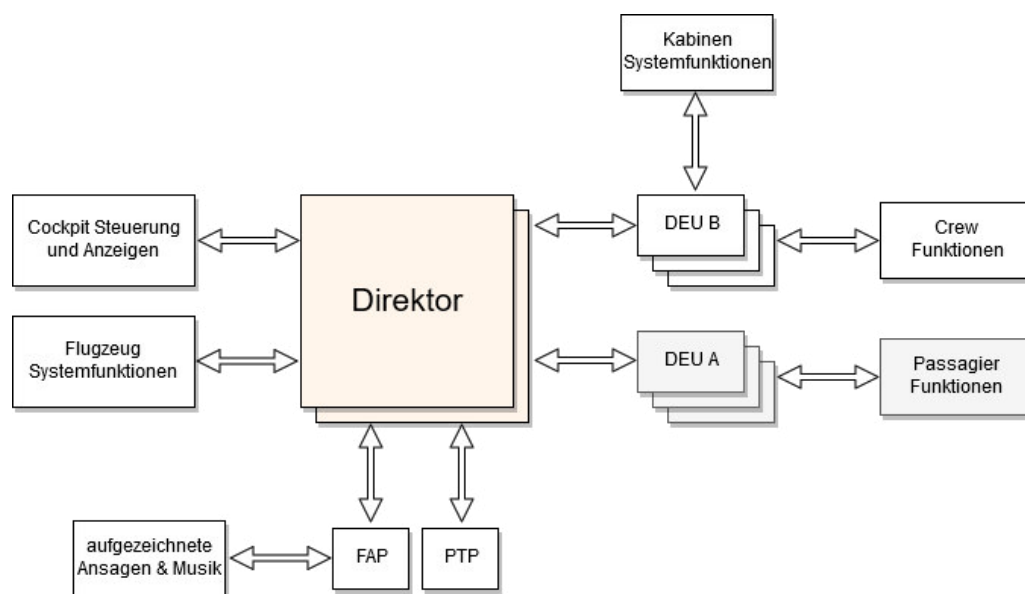


Abbildung 2.3: Das Kabinenmanagementsystem von AIRBUS mit Ansteuerung der Passagierfunktionen [13]

Das CIDS setzt sich aus Sicherheitsgründen aus zwei Direktoren zusammen, im Normalfall befindet sich einer im aktiven Modus und einer im hot-standby. In diesem Bereitschaftsmodus kann bei Ausfall des ersten Direktors auf den zweiten direkt umgeschaltet werden. Diese sind mit dem FAP verbunden, welches zur Visualisierung und Einstellung der Kabinenparameter und -funktionen genutzt wird. Zur Anzeige dient ein Bildschirm, der über einen Touchscreen bedient wird. Der Direktor kommuniziert durch Dekodierer- und Kodierer-Einheiten (engl.: *Decoder-Encoder-Unit*,

DEU) mit diesen. Unterschieden wird zwischen zwei Typen von DEUs. Einheiten vom Typ A verbinden die Passagierfunktionen mit dem CIDS und befinden sich entlang jeder Seite der Passagierkabine (Abbildung 2.4). Die Lautsprecher, Hinweiszeichen, Rufknöpfe und die generelle Beleuchtung sind in Untergruppem mit einer Typ A DEU verbunden. DEUs vom Typ B hingegen sind in der Nähe der Notausgänge angebracht und stellen eine Kommunikation zwischen dem CIDS und den Crew- und Kabinenfunktionen her. Angeschlossen werden daran z.B. die Flugbegleiterhandsets, Tür- und Rutschensensoren. Neben den Steuerungseinheiten enthält das CIDS eine Wartungseinheit (engl.: *Programming and Test Panel*, PTP) mit dem das System programmiert und getestet werden kann. Dies kommt vor allem bei der Wartung und Reparatur der Kabinensysteme zum Einsatz. [13]

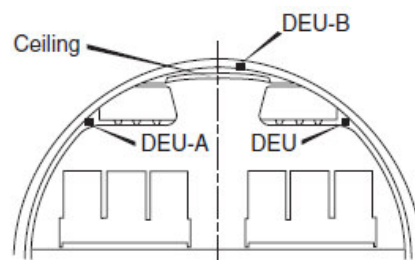


Abbildung 2.4: Schematische Anordnung der DEUs in der Kabine [14]

Für die Wechselwirkung zwischen CIDS und der Passagier Service Einheit sind die drei folgenden Verknüpfungen relevant [14].

- *Passagier Adresse*

Bei Durchsagen und Ankündigungen durch das Cockpit oder der Kabinencrew verteilt das CIDS diese an alle angeschlossenen Passagierlautsprecher.

- *Passagier ruf*

Vom Sitzplatz des Passagiers aus ist es möglich, über die Betätigung an der PSU einen Flugbegleiterruf abzusetzen. Der Ruf-Button kann bei Aktivierung leuchten und somit ein klares visuelles Signal an die Flugbegleiter geben.

- *Hinweiszeichen*

Das CIDS kontrolliert die vom Cockpit an den Passagier weitergeleiteten Signale für die beleuchtenden Hinweiszeichen *Non Smoking*, *Fasten Seat Belts* und *Return To Seats*-Durchsagen.

Die Hinweiszeichen werden vom Cockpit aus gesteuert, während Sprachdurchsagen oder Musik auch vom Kabinenpersonal über das FAP geregelt werden können. Alle ankommenden Signale werden dann über das CIDS weitergeleitet und verteilt.



## 2.2 Model-based Systems Engineerings

Flugzeugingenieure werden mit einer steigenden Komplexität ihrer Produkte konfrontiert und sind dabei einem schnell wachsenden Wettbewerb ausgesetzt. Besonders in der Luftfahrtbranche gibt es eine Vielzahl an Schnittstellen und Regularien, die bei der Prozessentwicklung berücksichtigt werden müssen. Eine Möglichkeit diesen Herausforderungen entgegenzutreten ist, den Entwicklungsprozess effizienter und kürzer zu gestalten. Der Einsatz von interdisziplinären Problemlösungsteams wird dabei zunehmend wichtiger. Damit diese zielgerichtet entwickeln können, bietet sich der Ansatz des MBSE an. Durch die Anwendung von Entwicklungsmethoden basierend auf Modellen, wird sich eine bessere Kommunikation bei der Zusammenarbeit im Team und eine erhöhte Qualität und Kontrolle des Endproduktes versprochen. Zudem lassen sich komplexe Zusammenhänge mit Hilfe von Modellen besser darstellen. [15]

“Model-based Systems Engineering (MBSE) is the *formalized application of modelling* to support system requirements, design, analysis, verification and validation activities beginning in the conceptual design phase and continuing throughout development and later life cycle phases.“

INCOSE SE Vision 2020 [16]

Das International Council of Systems Engineering (INCOSE) versteht unter der modellbasierten Systementwicklung (engl.: *Model-based Systems Engineering*, MBSE) die Nutzung von durchgängigen Modellen im Rahmen der Aktivitäten der Systementwicklung (engl.: *Systems Engineering*, SE) [16]. Der interdisziplinäre Ansatz ermöglicht die methodische Entwicklung von Systemen und fokussiert ein ganzheitliches und zusammenwirkendes Verständnis der Anforderungen, Dokumentation und der Entwicklung von Lösungen.

Dieser interdisziplinäre Ansatz verbindet das Vorgehen des traditionellen Systems Engineering mit visuellen Modellierungstechniken. Das Modell stellt dabei eine Abbildung des zu entwickelten Systems dar und unterstützt in der Erarbeitung der Wechselwirkungen und Abhängigkeiten der einzelnen Subsysteme untereinander. Dabei wird eine formale, grafisch orientierte Sprache genutzt, um das zu entwickelnde System zu beschreiben [17]. Im Gegensatz zu den klassisch textuell festgehaltenen Anforderungen, bietet der Einsatz von MBSE eine optisch übersichtlichere Darstellung aller Systeme. Die Modelle bilden eine Abstraktion der Realität ab und eliminieren dabei unnötige Komponenten.

Die Methodik, die dem MBSE zugrunde liegt definiert sich wie folgt. Eine Methodik ist die Kombination der zugehörigen Prozesse, Methoden und Werkzeuge (Abbildung 2.5). Der Prozess beschreibt eine logische Sequenz von Arbeitsschritten, die benötigt werden, um ein spezifisches Ziel zu erreichen. Die Methode enthält die Arbeitstechniken zur Umsetzung der Arbeitsschritte im angewandten Prozess. Das Tool oder auch Werkzeug ist das technische Instrument, um die Methode mit seiner Arbeitstechnik zu unterstützen. [13, 17]

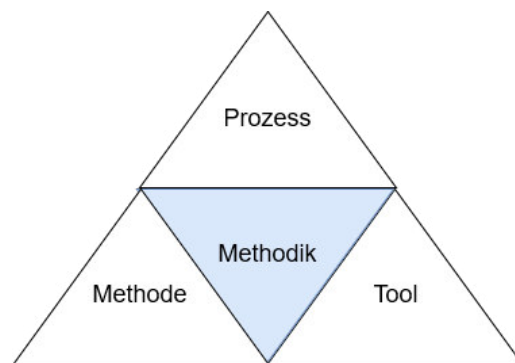


Abbildung 2.5: Begriffsdefinition der Methodik nach [13]

Für die Untersuchung des MBSE-Ansatzes bei der Auslegung von Flugzeugkabinen am Beispiel der PSU wird ein Prozess entwickelt, der ausgehend von definierten Anforderungen an das PSU-Konzept eine Platzierung der Funktionen innerhalb der Kabine durchführt und am Ende eine Bewertung ermöglicht. Ziel ist dabei, für die vorher festgelegten Anforderungen eine optimale Anordnung innerhalb der Kabine zu finden. Dafür wird ein Wissensmodell in Form einer regelbasierten Auslegungssystematik erstellt, in der die verschiedenen Randbedingungen und Gesetzmäßigkeiten zur Platzierung der Funktionen abhängig von den anfänglichen Anforderungen festgehalten werden. Mit Hilfe von Bewertungskriterien werden anschließend die Konzepte hinsichtlich des Passagierkomforts und möglicher Einsparpotenziale bei den Montagekosten bewertet. Durch die Anwendung des MBSE-Ansatzes können auch bei disruptiven Veränderungen die Ergebnisse anschließend mit anderen Szenarien verglichen werden. Wie bereits aufgeführt, wird für die Umsetzung und Durchführung der unterschiedlichen Arbeitsschritte im Prozess eine Methode benötigt.

In dieser Arbeit wird dies durch die Anwendung von Modellen realisiert. Mit denen kann das System der Passagier Service Einheit inkl. ihrer Wechselwirkungen und Schnittstellen zur Außenwelt abgebildet und die einzelnen beschriebenen Prozessschritte ausgeführt werden. Abbildung 2.6 gibt eine Übersicht über die entworfenen und angewendeten Modelle. Dabei handelt es sich um eine strukturierte Darstellung, die sich auf die folgenden vier Bereiche wie die Gesamtsystemanforderungen sowie auf das Systemverhalten, die Struktur, und die Wechselwirkungen mit anderen Sy-

systemen innerhalb der Kabine konzentriert. Zuerst werden mit einem Anforderungsmodell die charakteristischen Eigenschaften des Systems PSU festgehalten. Unterschiedliche Konzepte zur Realisierung der PSU erfordern divergente Anforderungen, die bei der Platzierung der einzelnen PSU-Funktionen berücksichtigt werden müssen. Die Struktur des Systems PSU wird mit zwei Modellen dargestellt. Zum einen wird für die Visualisierung sowie den Aufbau der Kabine und der PSU ein Geometriemodell verwendet. Zum anderen werden mit Hilfe einer Ontologie die Hierarchie und die Beziehungen zwischen den einzelnen Flugzeugkomponenten aufgezeigt. Für die Darstellung der Wechselwirkungen und des Systemverhaltens werden weitere Modelle benötigt. Das Funktionalitätenmodell zeigt das Systemverhalten der PSU, wie z.B. die elektrischen oder digitalen Signalflüsse. Eine weitere wichtige Verbindung ist die Interaktion zwischen den Funktionen der Passagier Service Einheit und dem Menschen. Dafür wird ein Modell zur Abbildung der Sinne und Fähigkeiten eines Menschen generiert. Dieses dient als Grundlage für die Bewertung neuer Konzepte unter dem Aspekt des Passagierkomforts. Die dabei wichtigsten Eigenschaften sind die Erreichbarkeit, die Hör- sowie Lesbarkeit von Funktionen und die Wahrnehmung der Belüftung. Neben dem Passagierkomfort können mit einem Montagekostenmodell zusätzlich für jedes PSU-Konzept mögliche Einsparpotenziale durch eine Vormontage ermittelt werden.

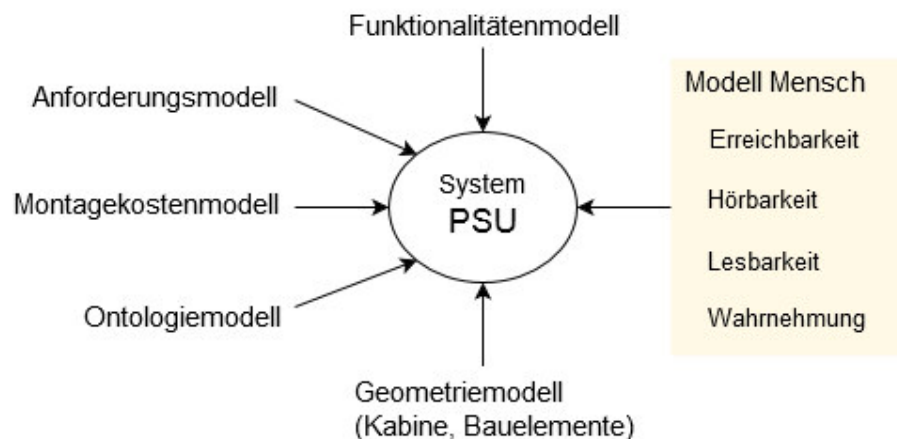


Abbildung 2.6: Modelle zur Abbildung des Systems Passagier Service Einheit

Weiterhin werden Werkzeuge zur Umsetzung der Methoden und des Prozesses benötigt. Bei dem Entwurf eines Flugzeugs nach dem modellbasierten Ansatz ist die Auswahl einer geeigneten Sprache zur Herleitung, Beschreibung und Dokumentation der Modelle wichtig. Für eine langfristige und nachhaltige Anwendung der zugrundeliegenden Methodik muss daher eine allgemein verwendete und standardisierte Modellierungssprache gewählt werden. Dies ermöglicht eine präzise und konsistente Kommunikation bei der weiteren Verwendung. Für diese Arbeit fiel die Wahl auf die Formensprache UML (engl.: *Unified Modeling Language*), da dessen Struktur leicht

zu verstehen und zu verarbeiten ist [18]. UML stellt wiederum einige Werkzeuge und Methoden bereit, die im Kontext dieser Arbeit Anwendung finden und im Folgenden aufgelistet sind.

### **Anwendungsfalldiagramm**

Bei diesem Diagramm werden Akteure und Anwendungsfälle mit ihren jeweiligen Abhängigkeiten und Beziehungen möglichst einfach dargestellt. Zudem wird dabei das erwartete Verhalten eines Systems visualisiert und dafür eingesetzt, die Anforderungen an dieses zu spezifizieren. Mit einer Systemgrenze kann außerdem der Kontext beschrieben werden. [13]

### **Klassendiagramm**

Die Klassendiagramme gehören zu einer der zentralen Techniken innerhalb der objektorientierten Methoden. Es beschreibt die Zusammenhänge von Klassen und Subklassen, wie z.B. bei der Vererbung von Eigenschaften oder Funktionen [19]. Dabei werden zudem die Methoden und Attribute der Klassen aufgezeigt [13].

### **Aktivitätsdiagramm**

Diese Diagramme beschreiben den Arbeitsvorgang und die Reihenfolge von Aktivitäten. Dabei kann sowohl bedingtes als auch paralleles Verhalten aufgeführt werden. Es beschreibt eine bestimmte, festgelegte Reihenfolge und kann damit z.B. für die zeitliche Darstellung bei der Generierung von Objekten verwendet werden. [13, 19]

## **2.3 Objektorientierte Programmierung**

Die Objektorientierte Programmierung findet heutzutage große Anwendung in vielseitigen Bereichen wie der Softwareentwicklung in der Informatik oder der Luft- und Raumfahrtbranche. Aufgrund der ständigen Weiterentwicklung von Computern und deren Rechenleistung sind aufwändige Simulationen und Modelle innerhalb kürzester Zeit möglich. Die objektorientierte Methode ermöglicht die Generierung von Software, die leicht zu warten und auch einfach zu erweitern ist.

Das zu simulierende Modell wird innerhalb der Objektorientierten Programmierung in einzelne Klassen aufgeteilt. Abbildung 2.7 zeigt die einzelnen Zusammenhänge beispielhaft an einer Klasse Flugzeug. Diese kann als Oberbegriff verstanden werden

und dient als Bauplan für die Erzeugung von Objekten. So können aus einer Klasse beliebig viele Objekte erzeugt werden und dank der Vererbung müssen Methoden und Attribute nur einmal definiert werden. Jedes Objekt besitzt einen bestimmten Zustand, der durch dessen Attribute und Methoden beschrieben wird. Dadurch unterscheiden sich einzelne Objekte in ihren Funktionen und Eigenschaften.

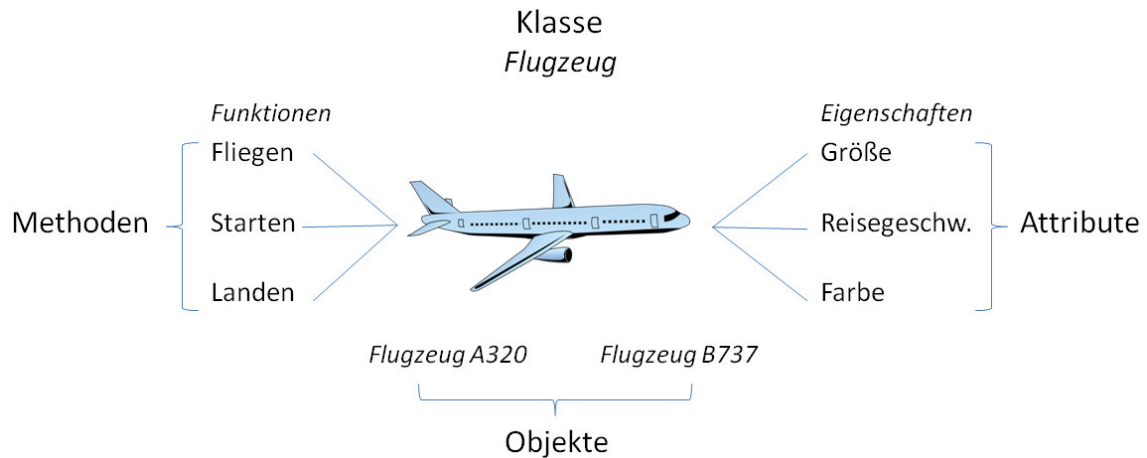


Abbildung 2.7: Struktur der Objektorientierten Programmierung

Für die Prozessdurchführung wird in dieser Arbeit das Tool MATLAB<sup>®</sup> von The MathWorks Inc. in der Version R2018a verwendet. Die Abbildung der Flugzeugkabine und der PSU erfolgt über einen objektorientierten Ansatz. Besonders bei der Generierung des Geometriemodells für die Flugzeugkabine mit vielen wiederkehrenden Bauteilen ist die Methode der Vererbung vielversprechend, indem Programmiercode reduziert und die Konsistenz in den Merkmalen sichergestellt wird. Dadurch können wieder verwendbare Komponenten erstellt und in größeren Programmen nach dem Baukastenprinzip zusammengesetzt werden. Dies ist eine effektive Möglichkeit, komplexe Systeme in Teilkomponenten zu zerlegen, zu verstehen und einmal geleistete Arbeit wiederzuverwenden. Dies erleichtert auch die Entwicklung und Pflege großer Anwendungen und Datenstrukturen. Zudem können in den einzelnen Objekten weitere Informationen abgespeichert werden, die z.B. für das Aufstellen des Funktionalitätenmodells oder der Ontologie benötigt werden.

Bei der Entwicklung neuer innovativer Kabinendesigns und der Darstellung vollständiger Konzepte inklusive der Wechselwirkungen mit dem gesamten Flugzeug ist der objektorientierte Ansatz im Zusammenhang mit den in Abschnitt 2.2 vorgestellten softwareunterstützten Modellierungswerkzeugen hilfreich [19]. Das im Rahmen dieser Arbeit erarbeitete Modell wird Aspekte wie den Komfort in der Kabine speziell zwischen dem Passagier und den PSU-Funktionen direkt in der Entwurfsphase des Flugzeugausstatters oder des Kunden berücksichtigen.



## 3. Stand der Technik

Das folgende Kapitel beschreibt den Aufbau und die Anforderungen an die Auslegung des Passenger Service Channels mit seinen Funktionen. Des Weiteren wird die Interaktion zwischen Passagier und PSU dargestellt, sowie deren Wechselwirkung zwischen Rumpf- bzw. Kabinengeometrie und anderen Kabinensystemen.

### 3.1 Die Passenger Service Unit

Neben der Bereitstellung eines Sitzplatzes und notwendiger Serviceeinrichtungen, werden in einer Kabine dem Passagier Zugänge zu eigenen Service-Elementen bereitgestellt. Diese befinden sich im Passagier Service Kanal (engl.: *Passenger Service Channel*, PSC), der oberhalb jeder Passagierreihe eingebaut ist. Alle Service-Funktionen werden in einer Passagier Service Einheit (engl.: *Passenger Service Unit*, PSU) zusammen gefasst, die wiederum im PSC angeordnet und fixiert wird.



Abbildung 3.1: Der Passenger Service Channel in einer A320 [20]

Abbildung 3.1 zeigt eine Draufsicht auf eine PSU einer A320 mit einer beispielhaften Anordnung der verschiedenen Service-Funktionen. Die Funktionen werden in dieser Arbeit in zwei Kategorien unterteilt. Zum einen die primären Funktionen, die gesetzlich vorgeschrieben sind und zum anderen die sekundären, die dem Komfort

der Passagiere dienen und als freie Angebote wahrgenommen werden können. Die folgende Auflistung zeigt die Unterteilung in die zwei Kategorien.

### **Primäre Funktionen**

- Sauerstoffmasken
- Anschnallzeichen
- Hinweiszeichen „Nichtraucher-Flug“
- Sprachansagen

### **Sekundäre Funktionen**

- Leselicht
- Flugbegleiterruf
- Individuelle Belüftung
- In-flight Entertainment

In einigen Flugzeugkabinen werden dem Passagier während der Flugreise elektronische Geräte zur Unterhaltung und für Informationen zum Flugverlauf bereitgestellt, das sogenannte In-flight Entertainment (IFE). Auf Kurz- und Mittelstrecken wird dies üblicherweise durch ausfahrbare Flachbildschirme unterhalb der Gepäckablage ermöglicht, die neben der aktuellen Flugzeugposition auf einer Landkarte auch Filme zeigen.

Die Anordnung und Anzahl der einzelnen Elemente der PSU variieren mit der Passagierkabinenkonfiguration. Jeder Sitzreihe ist genau eine PSU zugeordnet. Füllleisten zwischen den Passagier Service Einheiten passen diese an den Sitzabstand an. Dabei muss sichergestellt sein, dass die gesetzlichen Vorschriften eingehalten und dem Passagier Zugang zu den primären Funktionen gewährleistet wird.

#### **3.1.1 Zeitliche Entwicklung**

In den vergangenen Jahren haben sich trotz der vielen technologischen Fortschritte die Funktionen der PSU nicht verändert. Anhand der Abbildung 3.2a ist zu erkennen, dass die PSU der IL-62s von Air Koryo aus dem Jahr 1980 annähernd ähnlich aufgebaut ist, wie es in den heutigen modernen Verkehrsflugzeugen der Fall ist



(vgl. Abbildung 3.1). Diese besteht ebenfalls aus Leselichtern, individuellen Belüftungsventilen, einem Flugbegleiterruf und Lautsprecher für die Sprachansagen sowie Hinweiszeichen für den Passagier.

Deutlichere Unterschiede zum heutigen Modell sind in der optischen Verarbeitung und im Aufbau erkennbar. Getrieben durch die Leichtbauweise und die damit verbundene Reduzierung von Gewicht und der Erhöhung von Komfort für den Passagier an Bord des Flugzeuges, ist die PSU in ihren Abmaßen dünner und schmaler geworden. Der Wunsch des Passagiers nach mehr Stauraum in den Gepäckablagen hat maßgeblich dazu beigetragen. Durch Sonderaufschläge bei aufzugebendem Gepäck ist die Anzahl an Handgepäckstücken deutlich gestiegen und der vorhandene Bauraum für die PSU hat sich dadurch verringert.



(a) Die PSU einer IL-62s von Air Koyro<sup>1</sup> (b) Einbau der PSU ohne Versorgungskanal<sup>2</sup>

Abbildung 3.2: Frühere Auslegungsvarianten der PSU

Ein umfassender Entwicklungsschritt der letzten Jahren stellt die Einführung eines Passagier Service Kanals dar. Vor der Nutzung eines Versorgungskanals wurden die Passagier Service Einheit als Gesamtkonstruktion mit den Gepäckablagen verbaut, wie in Abbildung 3.2b dargestellt. Eine schnelle Anpassung der PSU an einen neuen Sitzabstand sowie der Ausbau fehlerhafter Komponenten erwiesen sich als sehr aufwendig und unflexibel. Durch die Entwicklung eines PSC konnte die Komplexität reduziert werden. Der Einbau der PSU ist dadurch individuell anpassbar und die Anschlüsse können über einen zentralen Versorgungskanal gelegt werden.

### 3.1.2 Heutige PSU-Designs

Heutige Kabinenkonzepte differieren zwischen den Airlines und ermöglichen damit der Fluggesellschaft individuelle Designs entsprechend ihren Wünschen zu schaf-

<sup>1</sup>Passagier Service Einheit aus dem Jahr 1980 [21]

<sup>2</sup>Convair CV-880 aus dem Jahr 1967 [22]

fen. Die Platzierung und Gestaltung der Passagier Service Funktionen werden dabei ebenfalls variiert. Während früher auf Kurz- und Mittelstrecken ebenfalls Bildschirme für das In-flight Entertainment eingebaut wurden, verzichteten viele der heutigen Fluggesellschaften auf den Einbau von diesem Serviceelement aufgrund der steigenden Anzahl selbst mitgebrachter tragbarer Elektrogeräte des Passagiers (engl.: *Portable Electronic Devices*, PED). Im folgenden Abschnitt werden einige Designs vorgestellt und miteinander verglichen.

Abbildung 3.3a zeigt die PSU einer AIRBUS A319-132 von Germanwings. Die Lichtschalter sowie der Flugbegleiterruf sind in einem Bauteil verbaut und heben sich von der Oberfläche des PSCs ab. Dadurch wird die Erreichbarkeit der Bedienelemente erleichtert und zusätzliche Beschriftungsfläche erzeugt. Dies dient vor allem für die Anzeigen der Sitzreihen und -nummern sowie für den Schriftzug *Schwimmwesten unter ihrem Sitz*. Dank der schrägen Seiten sind die Schriftzüge auch vom Gang aus stehend lesbar. Die Lautsprecher sind zusammen mit den beleuchteten Hinweiszeichen und Anschnallzeichen verbaut. Diese sind jedoch nur in jeder zweiten Sitzreihe platziert. Durch ein rotierendes Gelenk lassen sich die individuelle Belüftung für jeden Passagier anpassen und die Anströmrichtung der Luft sowie die Stärke variieren.



(a) Frontalansicht

Überschreiten der  
Lücke  
zwischen den  
Gepäckablagen



(b) Seitenansicht

Abbildung 3.3: Aufbau der Passenger Service Einheit in einer AIRBUS A319-132 von Germanwings<sup>3</sup>

<sup>3</sup>Eigene Aufnahme: Flug EW 2045 von Hamburg nach Stuttgart, Ersatzmaschine

Zusätzlich zu der optischen Umsetzung der Funktionen ist die Anordnung der Bauteile im Passenger Service Channel variabel. Eine häufig genutzte Variante ist in Abbildung 3.3b dargestellt. Die Sauerstoffmasken befinden sich direkt über den Köpfen der Passagiere gefolgt von der Belüftung, dem Bedienelement und den Leselichtern sowie der Hinweiszeichen und Lautsprecher. Dabei wird bei der Platzierung über die Abmaße der Gepäckablagen hinaus montiert. Damit ist eine möglichst gleichmäßige Anordnung in der Kabine gewährleistet und für jeden Passagier optisch identisch. Zudem befinden sich die Funktionen für jeden Passagier, unabhängig von der Sitzreihe, in der selben Reichweite. Allerdings bietet ein derartiges Konzept keine Möglichkeit für eine Vormontage der PSU. Die PSU muss nach der Montage der Gepäckablagen angebracht werden und ist damit erst im Rahmen der Endmontage einbaubar. Gerade für eine potenzielle Optimierung bei der Platzierung der PSU müssen auch die Kosten für die Endmontage berücksichtigt und speziell die Kostenreduzierung bei einer möglichen Vormontage betrachtet werden.

Ein weiteres Kabinendesign ist in einer AIRBUS A320-214 von Eurowings eingebaut (Abbildung 3.4a). Neben den typischen Elementen wie den Sauerstoffmasken und den Lautsprechern, ist besonders die Umsetzung der Hinweiszeichen und des Flugbegleiterrufs hervorzuheben. Im Gegensatz zum Design von Germanwings, sind zwei Flugbegleiterrufknöpfe installiert, die über eine eigene Beleuchtung verfügen. Betätigt der Passagier den Rufknopf, leuchte dieser blau auf und signalisiert somit dem Kabinenpersonal in welcher Sitzreihe Unterstützung benötigt wird. Des Weiteren sind die Nummerierung der Sitzreihen sowie die Angaben für die Sitznummern nicht Bestandteil der Passagier Service Einheit und sind daher separat an den Vorderkanten der Gepäckablagen angebracht. Weiterhin ist die Darstellung der Hinweiszeichen für einen Nichtraucherflug nicht illuminiert, sondern als fester Aufkleber mittig angebracht. Stattdessen sind in einem separaten Bauteil die beleuchteten Anschlanszeichen mit dem Hinweis für das Ausschalten von portablen elektronischen Geräten verbaut (Abbildung 3.4b). Durch die Zunahme von PEDs in der Kabine findet diese Art der Hinweiszeichen immer mehr Einzug in den modernen Flugzeugkabinen. In den letzten Jahren ist die Anzahl der mitgebrachten tragbaren elektronischen Geräte in den Flugzeugen gestiegen. Aufgrund neuer Angebote der Fluggesellschaften wie die Bereitstellung von WLAN (engl.: *Wireless Local Area Network*) während des Reiseflugs, bringen mehr Passagiere auch auf Kurzstreckenflügen ihre eigenen Unterhaltungssysteme mit an Bord. Im Jahr 2013 ermöglichte die EASA den Fluggesellschaften, die Verwendung von PEDs, wie Laptops, Handys oder Spielekonsolen, fast während der gesamten Flugdauer zu gestatten, solange die Geräte sich im Flugmodus befinden und während Start- und Landung ausgeschaltet werden [23].

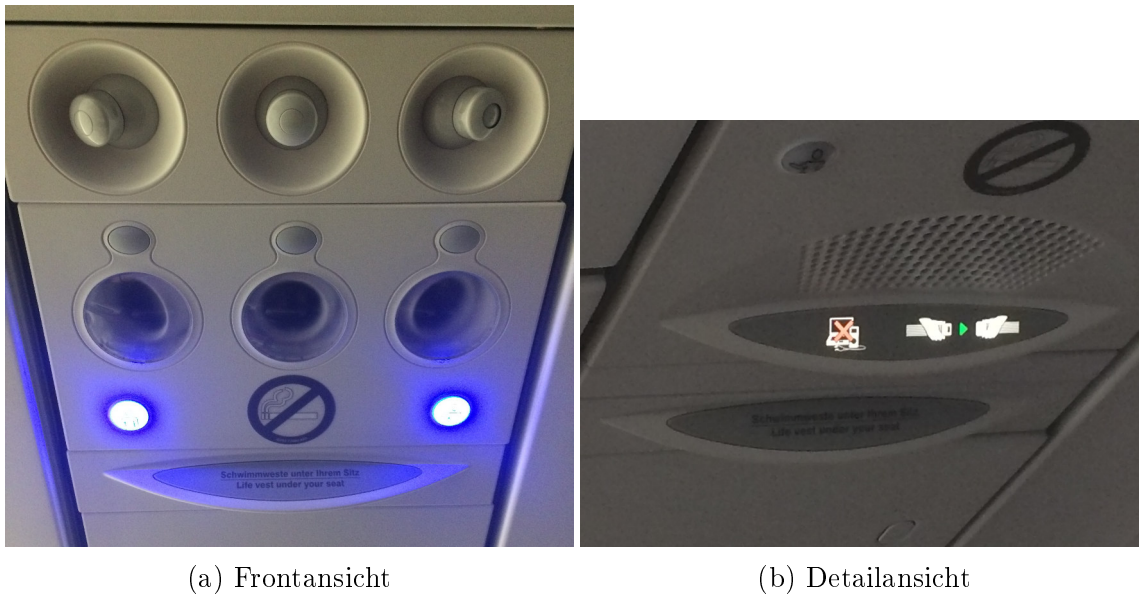


Abbildung 3.4: Die Passenger Service Unit einer A320-214 von Eurowings<sup>4</sup>

Abbildung 3.5 zeigt das PSU-Design von Astronics PECO Inc. für die Ausstattung der BOEING B737 Sky Interior. Das Design zeichnet sich durch ein reduziertes Gewicht, eine kompakte Bauweise und einen einfachen Einbau in die Gepäckablagen aus. Alle Funktionen der Passagier Service Einheit wurden zudem in einem Modul verbaut. Dadurch stehen jeder Sitzreihe ein Lautsprecher und die Hinweiszeichen zur Verfügung anstatt in nur jeder zweiten Reihe. Besonders hervorzuheben ist der Einbau des Generators für die Bereitstellung von Sauerstoff im Notfall (gelb eingekreist). Der Generator wird nicht wie bei anderen Konzepten aufgrund des geringen Bauraums parallel neben den Sauerstoffmasken eingebaut sondern direkt über die Belüftungselemente. Der Einbauraum in dem Passagier Service Kanal der Boeing 737 bietet in vertikaler Richtung mehr Raum und fördert dadurch eine kompaktere Bauweise der PSU.

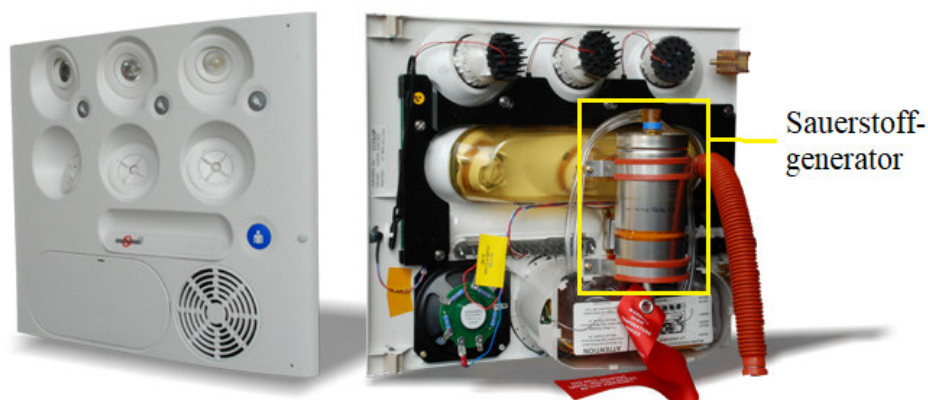


Abbildung 3.5: Die Passenger Service Unit einer B737 von Astronics PECO Inc. [24]

<sup>4</sup>Eigene Aufnahme: Flug EW 2045 von Hamburg nach Stuttgart

## 3.2 Anforderungen an die Systemauslegung

Die PSU unterliegt sicherheitsrelevanten Anforderungen, muss Signale des Cabin Management System und ggf. auch des IFE empfangen, ist teilweise an verschiedene elektrische Bordnetze angeschlossen und kann weitere Aktionen steuern. Abbildung 3.6 zeigt eine Übersicht dieser Anforderungen an die Systemauslegung.

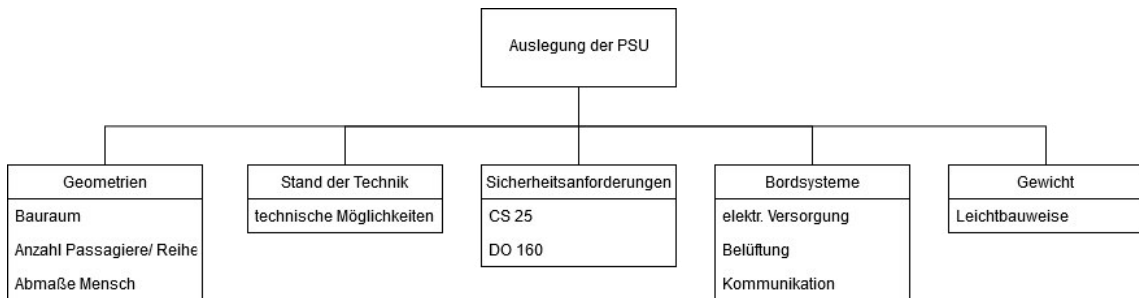


Abbildung 3.6: Anforderungen an die Passenger Service Unit

Bei der Auslegung müssen mehrere Faktoren berücksichtigt werden. Ein Einflussfaktor ist die Geometrie. Der vorhandene Bauraum für die Passagier Service Einheit wird durch das gewählte Kabinenlayout und deren dazugehörige Gepäckablagen bestimmt. Im Zuge der Standardisierung wurde die Höhe des Bauraumkanals auf 5 inch bei der A320-Familie festgelegt [3]. Lediglich die Breite des Kanals variiert mit der Anzahl der Sitze pro Reihe. Des Weiteren muss die Morphometrie des Menschen berücksichtigt werden. Besonders im Hinblick auf die Erreichbarkeit von Bedienelementen, z.B. die Betätigung des Lichtschalters ist die Diversität des menschlichen Körpers einzubeziehen.

Ein weiterer Faktor stellt der Stand der Technik dar. Für die Auslegung der einzelnen Funktionen kann auf diverse technologische Möglichkeiten zurückgegriffen werden. Dadurch können neue Varianten, z.B. für die Ansteuerung einzelner Funktionen durch die Nutzung von Bluetooth, realisiert werden.

Die PSU steht in Verbindung mit verschiedenen Bordsystemen im Flugzeug und besonders in der Kabine. Die Anschlüsse stellen damit eine weitere Anforderung an die Systemauslegung. Es muss eine elektrische sowie eine pneumatische Versorgung ermöglicht werden. Zudem kommunizieren einige Funktionen der PSU mit anderen Systemen wie dem CIDS und müssen über Schnittstellen angeschlossen werden.

Airlines wollen durch den Leichtbau-Ansatz ihre Flugzeuge ökonomischer betreiben. Je leichter die Konstruktion eines Flugzeuges ist, desto mehr lässt sich entweder Treibstoff einsparen oder die Ladekapazität und damit die Auslastung erhöhen. Bei der Auslegung der PSU muss ebenfalls darauf geachtet werden, dass das Bauteil so leicht wie möglich ist, aber dabei auch die benötigte Stabilität gewährleistet. Die

Bauweise der PSU stellt im Gesamtkontext der Verkehrsflugzeuge nicht den größten Anteil am Gewicht, unterliegt aber dennoch diesen Kriterien.

Als letzte Anforderung haben die Sicherheitsvorschriften einen großen Einfluss auf die Systemauslegung. Sie gewährleisten die Mindestanforderungen an alle Systeme und Funktionen im Normal- als auch im Fehlerfall. Dadurch stellen sie eine harte Anforderung dar und werden im folgenden Abschnitt genauer erläutert.

## Sicherheitsanforderungen in der Luftfahrt

In der von der European Aviation Safety Agency (EASA) herausgegebenen Bauvorschrift über die Bauartzulassung für Großflugzeuge (engl.: *Certification Specification for Large Aeroplanes*, CS-25) sind die Mindestanforderungen für die Zertifizierung eines Flugzeugs beschrieben. Die für die Auslegung der PSU relevanten Abschnitte sind in Tabelle 3.1 aufgeführt. [25]

Titel	Kapitel	Bauteil
Emergency Landing conditions - General	CS 25.561	alle
Design and construction - General	CS 25.623	alle
Passenger information signs and placards	CS 25.791	Hinweiszeichen
Fire protection: systems	CS 25.869	elektr. Bauteile
Electrical Equipment and installations	CS 25.1352	elektr. Bauteile
Public address system	CS 25.1423	Lautsprecher
Equipment standards for oxygen dispensing units	CS 25.1447	Sauerstoffmaske
Chemical oxygen generators	CS 25.1450	Sauerstoffmaske
Protection of oxygen equipment from rupture	CS 25.1453	Sauerstoffmaske

Tabelle 3.1: Relevante Kapitel der CS-25 für die Passagier Service Einheit [25]

Die ersten beiden Kapitel der Verordnung beschreiben die allgemeinen Anforderungen an alle Bauteile, den auftretenden Lastfällen entsprechend standzuhalten, sowie einen Sicherheitsfaktor zu beinhalten. Dimensionierend sind dabei die Crashlasten bei einer Vorwärts-Beschleunigung von 9g und im 3g Manöver-Flug. Zudem müssen die Bauteile Vibrationen standhalten können und dürfen im Falle des LöSENS den Passagier nicht direkt verletzen oder den Zugang zu den Notausgängen blockieren. Für das In-flight Entertainment bzw. dessen Bildschirme muss zudem die Kopffreiheit des Passagiers gewährleistet sein und darf die Nutzung der Sauerstoffmasken im Notfall nicht beeinflussen.

Speziell für die Hinweiszeichen gilt, dass diese unter allen Kabinen-Beleuchtungsszenarien von jedem Sitzplatz lesbar sein müssen. Symbole sind dabei den Buchstaben zur

Verdeutlichung vorzuziehen. Im Gegensatz zu den beleuchteten Anschallzeichen, kann bei einem permanenten Nichtraucherflug das Symbol auch als 5 cm großer Aufkleber angebracht werden.

Für alle elektrischen Komponenten der Kabine, und damit auch die der PSU, müssen zudem allgemeine Randbedingungen wie elektromagnetische Verträglichkeit, Geräuschdämmung, Widerstand gegen Feuer und Vibrationen erfüllt sein. Der Nachweis kann mit der von der Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA) veröffentlichten Standardprüfvorschrift DO-160 (engl.: *Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment*) erbracht werden [13]. Je nach Kriterium der Komponenten müssen diese ein gewisses Sicherheitslevel erreichen. Sicherheitsrelevante Systeme, wie z.B. die Notfall-Sauerstoff-Versorgung, müssen eine deutlich höhere Wahrscheinlichkeit gegen einen Ausfall aufweisen als weniger wichtige Systeme (z.B. das In-flight Entertainment).

Für die Auslegung der Lautsprecher muss, basierend auf Kapitel 1423 der CS-25, bei Ausfall aller Triebwerke und der APU genügend Strom für die Versorgung zur Verfügung stehen. Damit müssen Durchsagen von min. 10 min für den Notfall gewährleistet werden. Zudem müssen die Sprachdurchsagen von allen Sitzplätzen aus für die Passagiere verständlich sein.

Die letzten Kapitel der CS-25 beschreiben die Anforderungen an die Sauerstoffmasken. Jeder Passagier muss eine eigene Sauerstoffmaske zur Verfügung gestellt bekommen und für Verkehrsflugzeuge muss die Gesamtzahl aller Sauerstoffmasken die Anzahl der Passagiere um 10 % übersteigen. Zudem darf die chemische Reaktion des Generators zur Herstellung von Sauerstoff keine Gefahr für die anderen Elemente der PSU darstellen.

Zusammenfassend lassen sich hieraus bereits einige Regeln für die Auslegung der PSU und der Erstellung neuer Konzepte zur Anordnung der Funktionen ableiten. Dennoch sind basierend auf den sicherheitsrelevanten Vorschriften noch viele Freiheiten für die Umsetzung und Anordnung der Funktionen in der Kabine vorhanden.

### 3.3 Anwendungsfälle der PSU-Funktionen

Im folgenden Abschnitt wird die Passagier Service Einheit in ihre einzelnen Funktionsgruppen unterteilt und ihre Systemgrenzen abgesteckt. Für die Darstellung der Wechselwirkungen zwischen der PSU und dem Passagier sowie den Flugzeugsystemen werden daher Anwendungsfälle erstellt. Diese konzeptionelle Modellierung vor der Entwicklung eines Programmcodes hilft bei der Identifikation von Schnittstellen und Anforderungen an das spätere System. Um den Detaillierungsgrad möglichst

übersichtlich zu halten, wird für jede Funktion der PSU ein eigenes Anwendungsfalldiagramm erstellt. Bei der Betrachtung wird speziell auf die A320-Familie eingegangen und Beispiele für eine Single Aisle Ausstattung mit drei Passagieren pro Sitzreihe untersucht [3].

Ein Anwendungsfall beschreibt im Gegensatz zu den Passagier Service Funktionen eine Menge von Szenarien, die durch ein gemeinsames Benutzerziel verbunden sind [19]. Ein Szenario wiederum ist eine Folge von Schritten, die die Interaktion zwischen einem Benutzer und einem System beschreibt. Bei der Darstellung werden verschiedene Symbole verwendet und in der Legende jeweils neben den folgenden Abbildungen aufgeführt. Ein Akteur beschreibt einen Anwender, der einen Anwendungsfall durchführt und als Strichmännchen dargestellt ist. Mehrere Akteure können über eine Spezialisierung zusammen gefasst werden (Pfeil mit offener Spitze). Die Notation für einen Anwendungsfall ist eine Ellipse, während Objekte mit einem Rechteck dargestellt werden. Die Beziehungen der einzelnen Symbole untereinander unterscheiden sich in zwei Typen. Zum einen der Kontrollfluss / Aktivität, der die Kommunikation zwischen einem Akteur und einem Anwendungsfall oder Objekt kennzeichnet (Pfeil). Zum anderen die Rückmeldung / Feedback, die in Form eines gestrichelten Pfeils symbolisiert wird. Alle Elemente befinden sich einem Systemkontext und werden über eine rechteckige Systemgrenze abgesteckt. Im Rahmen der Erarbeitungsphase werden damit speziell die Funktionen der PSU analysiert und abstrahiert von technischen Lösungen betrachtet. Das Anwendungsfalldiagramm ist ein Bestandteil des Model-based Systems Engineering und ist der Modellierungssprache UML zu zuordnen (siehe Abschnitt 2.2).

### Sauerstoffmasken

Entstehen giftige Gase und austretender Rauch in der Kabine oder kommt es zu einem Druckabfall in dieser, fallen automatisch Sauerstoffmasken aus einer Vorrichtung der PSU. Der zugehörige Anwendungsfall für die Nutzung der Sauerstoffmasken ist in Abbildung 3.7 dargestellt. In diesem sind die beteiligten Akteure sowie deren Interaktion mit den Baugruppen der PSU verdeutlicht. Die Baugruppe der Sauerstoffmasken setzt sich aus einem chemischen Sauerstoffgenerator, einer elektrischen Ansteuerung und den Sauerstoffmasken zusammen. Die Anzahl der Masken entspricht der Anzahl der Passagiere pro Sitzreihe. Einige Baugruppen haben allerdings aufgrund der Vorschrift der CS-25 (Abschnitt 3.2) eine zusätzliche Sauerstoffmaske eingebaut.

Das Auslösen der Sauerstoffmasken erfolgt durch einen elektrischen Verriegelungsmechanismus in der Abdeckung, der zum einen automatisch auslöst, wenn die Kabinendruckhöhe von 14000 ft (+0, -500 ft) überschritten wird oder wenn der Pilot



ein entsprechendes Signal sendet. Die ankommenden Signale werden daraufhin vom CIDS an die angeschlossenen PSUs verteilt. Neben der elektrischen Auslösung hat das Bordpersonal die Möglichkeit die Verriegelung auch manuell zu lösen und somit im Fehlerfall einen Zugang zum Notfall-Sauerstoff zu gewährleisten.

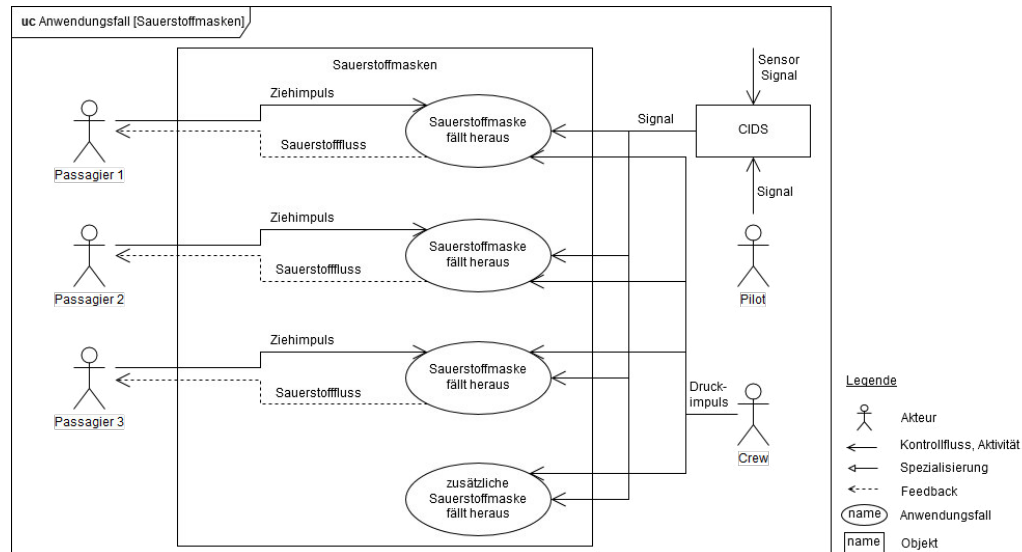


Abbildung 3.7: Anwendungsfall für die Sauerstoffmasken

Beim Auslösen der Masken wird eine vorher aufgenommene Instruktion für die Benutzung dieser automatisch über die Lautsprecher abgespielt. Sobald der Passagier an der Maske zieht, wird ein Impuls an den Generator geschickt, der daraufhin durch eine chemische Reaktion Sauerstoff produziert. Für mindestens 15 min können die Generatoren puren Sauerstoff bereitstellen während die Piloten einen Notabstieg auf eine Flughöhe von 3000 m durchführen [26].

## Hinweiszeichen

Für bestimmte Flugabschnitte werden die Passagiere gebeten sich anzuschnallen und hinzusetzen. Des Weiteren ist Rauchen an Bord der meisten Verkehrsflugzeuge verboten, da Feuer eines der größten Gefahren in der Kabine darstellt. Informiert werden die Passagiere über beleuchtete Zeichen in der Passagier Service Einheit. Der Anwendungsfall dieser Baugruppe ist in 3.8 abgebildet. Gemäß der Anforderungen an die Sicherheit aus Abschnitt 3.2 müssen die Hinweiszeichen von jedem Passagier sitzend gesehen werden können. Allerdings gibt es keine Vorschriften über den Abstand zum Passagier oder die Anordnung der Baugruppe. In den meisten Verkehrsflugzeugen werden daher die Hinweiszeichen nur in jeder zweiten Sitzreihe verbaut, sodass mehrere Passagiere ihre Informationen von einer Baugruppe erhalten.

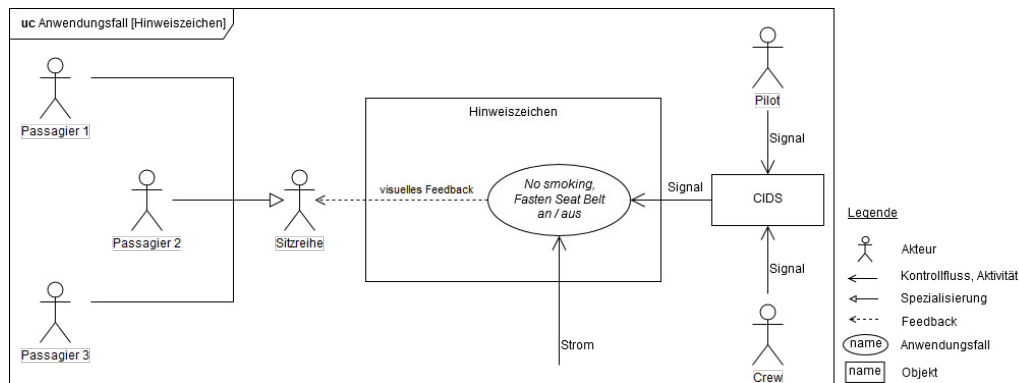


Abbildung 3.8: Anwendungsfall für die Hinweiszeichen

Gesteuert werden die Anschnall- und *No-Smoking*-Zeichen vom Cockpit aus. Zudem hat die Crew ebenfalls die Möglichkeit die Hinweiszeichen zu aktivieren oder zu deaktivieren. Die gesendeten Signale werden wiederum vom CIDS verwaltet und verteilt. Entsprechend dem gesendeten Signal werden die Hinweise illuminiert oder nicht und senden ein visuelles Feedback an den Passagier.

## Sprachansagen

Vergleichbar zur Anordnung der Hinweiszeichen gibt es keine vorgeschriebenen Abstände und Platzierungen der Sprachansagen im Flugzeug. Die Ansagen müssen lediglich für die Passagiere von ihren Sitzplätzen aus verständlich sein. Daher werden in den meisten heutigen Verkehrsflugzeugen diese zusammen mit den Hinweiszeichen in einer Baugruppe zusammengefasst. Abbildung 3.9 zeigt den Anwendungsfall für die Sprachansagen. Die Baugruppe besteht in erster Linie aus einem Lautsprecher, der durch die gesteuerten Signale vom CIDS ein akustisches Feedback für die Passagiere erzeugt. Durchsagen werden entweder vom Piloten und der Crew direkt durchgeführt oder vorher aufgenommene Ansagen werden vom CIDS in bestimmten Flugabschnitten automatisch abgespielt.

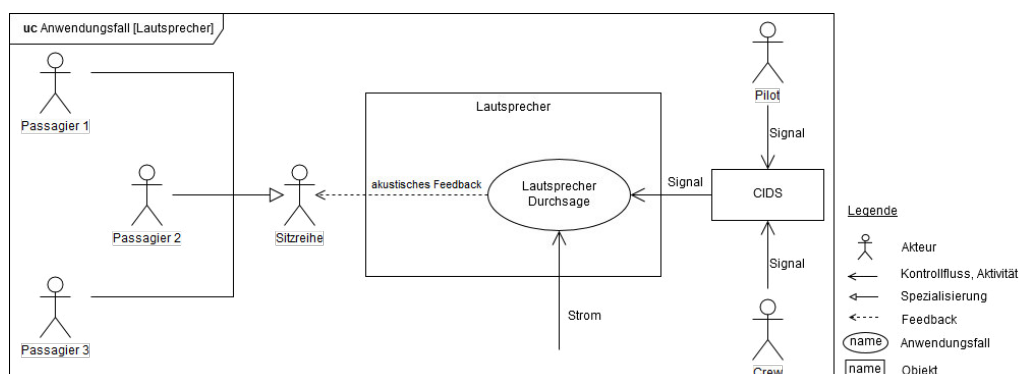


Abbildung 3.9: Anwendungsfall für die Sprachansagen

# Leselichter

Jeder Passagier hat die Möglichkeit unabhängig von dem gegenwärtigen Kabinenbeleuchtungsszenario ein individuelles Leselicht zu betätigen. Dieses ermöglicht dem Passagier während des Fluges zu lesen oder mit seinen persönlichen Geräten zu arbeiten. Abbildung 3.10 zeigt die Wechselwirkungen für die Leselichter mit dem Passagier und der Flugbesatzung. Betätigt der Passagier einen Lichtschalter in der PSU, sendet dieser ein Signal an die Lampe und schaltet diese entweder ein oder aus. Der Passagier erhält daraufhin ein visuelles Feedback der Lampe. Neben der Steuerung durch den Passagier, hat die Crew die Möglichkeit die individuelle Beleuchtung in der Kabine freizugeben oder in Notsituationen abzuschalten. Die Steuerung erfolgt ebenfalls über das CIDS, welches die entsprechenden Signale an die PSU schickt.

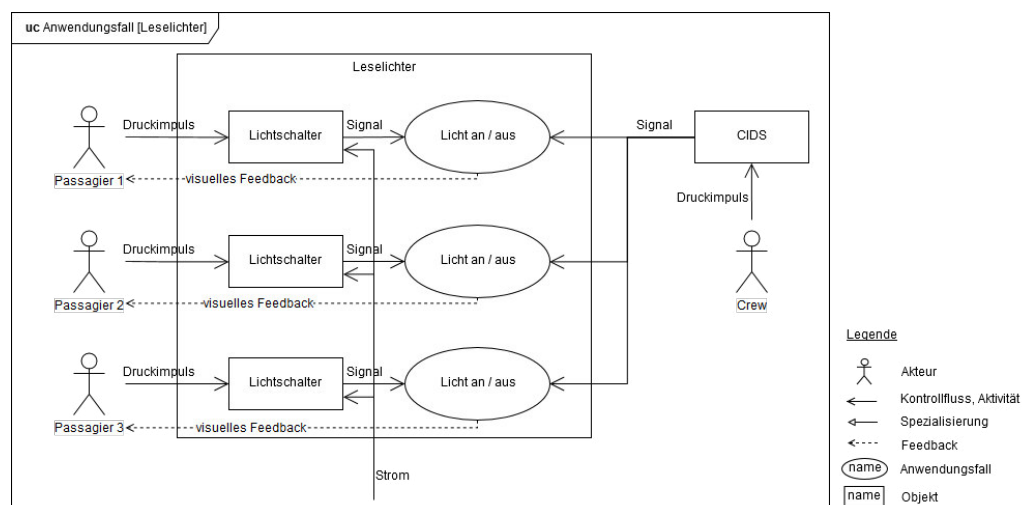


Abbildung 3.10: Anwendungsfall für die individuellen Leselichter

## Flugbegleiterruf

Im Flugbetrieb kann der Passagier über eine Ruffunktion an der PSU einen Flugbegleiter anfordern und auf sich aufmerksam machen, wenn der Passagier z.B. Fragen zum Flugablauf hat oder Unterstützung benötigt. Die Anzahl der Rufknöpfe pro Reihe variiert mit der Anzahl der Passagiere. In den meisten Fällen werden jedoch ein oder maximal zwei Rufknöpfe eingebaut. Abbildung 3.11 zeigt den Anwendungsfall für die Nutzung des Flugbegleiterrufs. Der Passagier betätigt einen Rufknopf an der PSU und sendet damit automatisch ein direktes Signal an das CIDS. Über das angeschlossene FAP wird das Bordpersonal über die Betätigung des Flugbegleiterrufs informiert und erhält Informationen über die Sitzreihe, von der das Signal gesendet wurde.

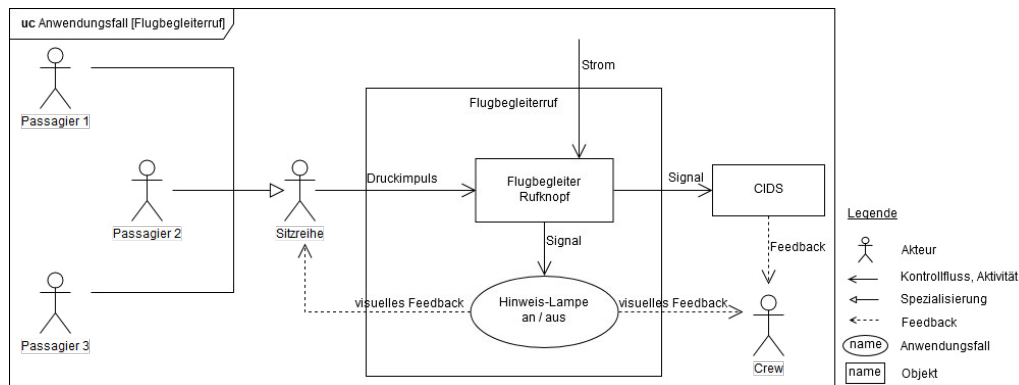


Abbildung 3.11: Anwendungsfall für den Flugbegleiterruf

Für eine visuelle Rückmeldung, ob der Rufknopf betätigt wurde, wird eine kleine Lampe an oder ausgeschaltet, die den Flugbegleiterruf beleuchtet. Diese unterstützt vor allem die Crew bei einer schnellen Ortung der Sitzreihe. Zusätzlich ertönt dabei ein kurzer Ton über die Lautsprecher, um die Besatzung auf den Ruf des Passagiers aufmerksam zu machen.

### Individuelle Belüftung

Jeder Passagier kann über einen Frischluftauslass die individuelle Belüftung steuern. Das System ist über die Luftversorgung in der Kabine an die Klimaanlage angeschlossen. Wenn der Passagier an dem Frischluftauslass dreht, strömt zusätzliche Luft aus. Die Regulierung der Strömungsstärke variiert mit dem Durchmesser des geöffneten Auslasses und lässt sich damit an die Wünsche des Passagiers manuell anpassen. Zudem kann der Einstellwinkel der Luftdüsen ebenfalls geändert und individuell angepasst werden. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 3.12 dargestellt und zeigt die Interaktion zwischen der Baugruppe der Belüftung und dem Passagier.

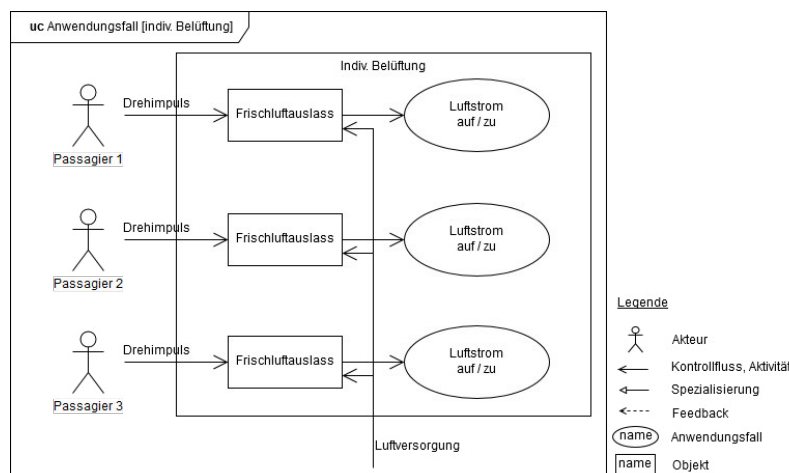


Abbildung 3.12: Anwendungsfall für die individuelle Belüftung

## In-flight Entertainment

Über Bildschirme in der Kabine können während des Reiseflugs Filme oder Informationen zum derzeitigen Flug angezeigt werden. Passagiere können das In-flight Entertainment auf Kurzstreckenflügen nicht direkt steuern. Der Pilot oder die Crew schalten über Bedienelemente im Cockpit und der Kabine das gezeigte Programm an oder aus. Verwaltet werden die Signale über das CIDS, welches die Bildschirme direkt ansteuert. Der Anwendungsfall ist in Abbildung 3.13 dargestellt.

Da es sich bei dieser Baugruppe um ein freies Angebot seitens der Fluggesellschaft handelt, gibt es keine Vorschriften zur Anordnung der Bildschirme in der Kabine. Es zeigt sich jedoch in den meisten Verkehrsflugzeugen, dass die Bildschirme nur in jeder dritten Sitzreihe angeordnet werden und damit einen anscheinend angemessenen Sichtabstand für die Passagiere darstellen.

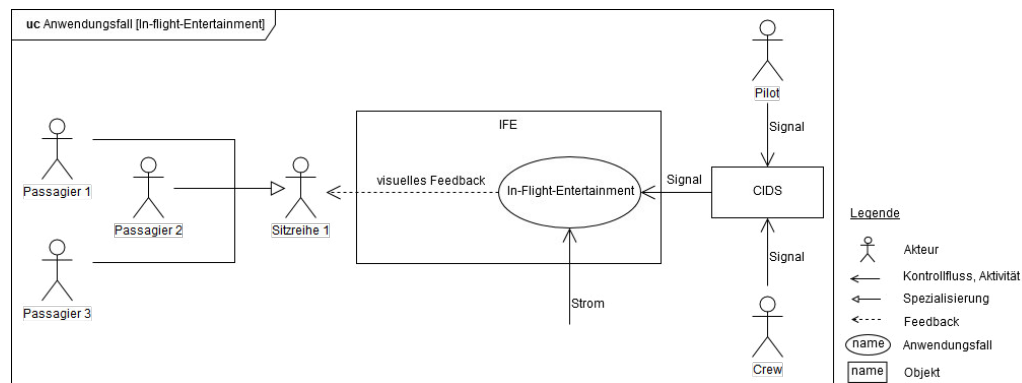


Abbildung 3.13: Anwendungsfall für das In-flight Entertainment

Mit diesen Anforderungen an die Systemauslegung der Passagier Service Einheit und der Abgrenzung der einzelnen Baugruppen und ihren Anwendungsfällen kann im nächsten Schritt eine Logik aufgestellt werden. Die Regeln zur Anordnung der PSU-Funktionen lassen sich aus den in diesem Kapitel ermittelten Daten ableiten.

## 3.4 Modellbasierte Lösungsansätze im Flugzeugvorentwurf

Einige Unternehmen und Universitäten haben sich bereits mit einem modellbasierten Lösungsansatz im Flugzeugentwurf beschäftigt. Im folgenden Abschnitt werden daher einige der Lösungen, Herangehensweisen und Modelle zur Betrachtung der Flugzeugkabine vorgestellt und zum Vorgehen der vorliegenden Arbeit abgegrenzt.

## Pacelab Cabin

TXT e-solutions ist ein internationaler Anbieter von Ingenieur-Software-Lösungen, die während des gesamten Produktlebenszyklus bei den unternehmens- und geschäftskritischen Kernprozessen unterstützen. Eine der entwickelten Tools ist die Software PACELAB CABIN. Als erste kommerzielle Flugzeug- und Kabinenkonfigurationssoftware bietet diese eine umfassende und zuverlässige Entscheidungshilfe bei der Entwicklung von Kabinenkonzepten. Die Software verspricht eine optimale Nutzung des Kabinenbereichs bei bleibendem Komfort für den Passagier [27].

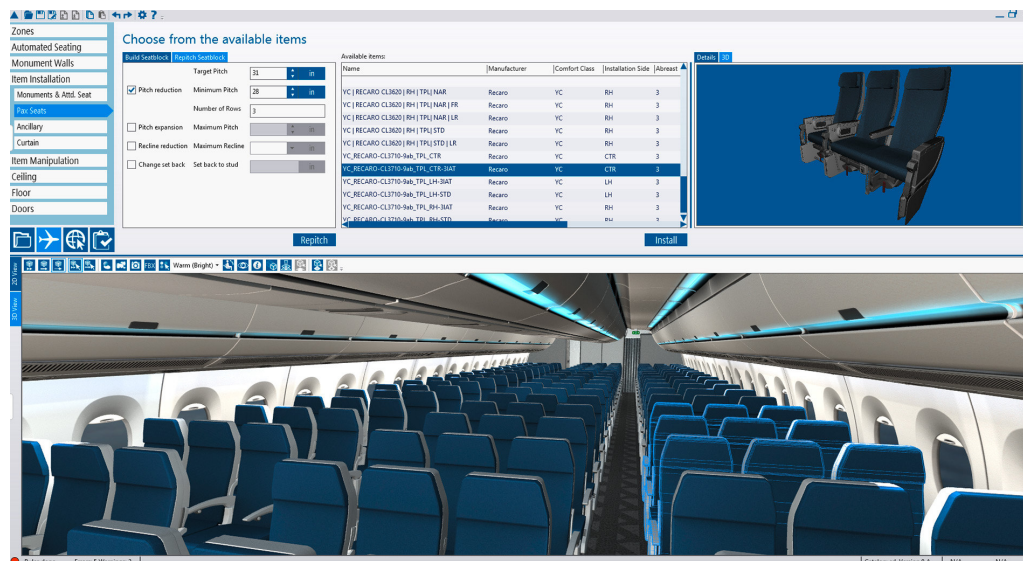


Abbildung 3.14: Benutzerinterface von Pacelab Cabin [27]

Die entwickelte Software basiert auf vorher streng definierten Regeln [27]. Dabei sind z.B. die Gangbreite, Anzahl und Platzierungen der Notausgänge bereits festgelegt. Für die Untersuchung von bestimmten Kabinenkonzepten muss daher im Vorfeld ein bestimmtes Kabinenmuster ausgewählt werden. An dem kann dann auf Basis der vordefinierten Regeln überprüft werden, ob das Konzept alle Anforderungen erfüllt oder Bedingungen verletzt. Zusätzlich bietet das Programm einen automatischen Sitzgenerator, der ebenfalls Monumente und andere Kabinenelemente in der Kabine platziert [27]. Genutzt werden kann das Tool für alle Kabinensysteme inkl. der Galleys, Toiletten, IFE und das Lining. Zudem bietet die Software eine interaktive virtuelle Kabine, bei der der Mensch mithilfe von Virtual Reality das fertige Kabinenszenario erleben kann. Weitere Vorteile sind die Anbindung an CAD-Software für den Import von Geometrien, die automatische Erstellung von Ingenieurszeichnungen nach dem Dokumentenstandard und die Gestaltung von 3D animierten Videos. Insgesamt kann das Programm verschiedene Kabinendesignumgebungen anbieten und einige Automatisierungsfunktionen bereitstellen, erfordert aber bei neuen Rumpfdesigns einen beträchtlichen Aufwand für die Definition [11].

### CPACS vom DLR

Seit 2005 entwickelt das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) das Common Parametric Aircraft Configuration Schema (CPACS) für das Lufttransportsystem. Es ermöglicht Ingenieuren den Austausch von Informationen zwischen ihren eigenen Tools und ist daher ein Treiber für den multi-disziplinären Flugzeugentwurf. Die Anzahl der Schnittstellen in der Modellierung von Flugzeugen und im Flugzeugentwurf ist für einen flexiblen und effizienten Informationsfluss entscheidend. Da CPACS einem zentralen Modellansatz einer einheitlichen Sprache zur Beschreibung folgt, werden die Anzahl der Schnittstellen auf ein Minimum reduziert und überwunden damit eine der großen Hürden bei der Zusammenarbeit unterschiedlicher Teams. [28]

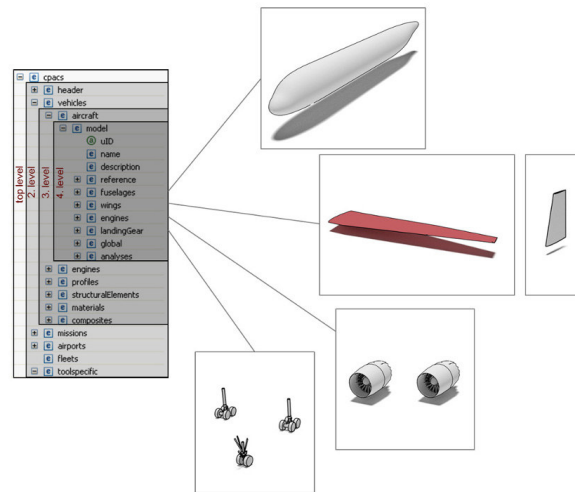


Abbildung 3.15: Aufbau der CPACS-Datenstruktur [29]

CPACS beschreibt sowohl die parametrischen Eigenschaften von Flugzeugkonfigurationen als auch die von Transportsystemen in einer strukturierten, hierarchischen Weise. Abbildung 3.15 zeigt den schematischen Aufbau. Durch die standardisierte Ablage von Informationen wird der Austausch von Analyseergebnissen für neue Flugzeugmuster deutlich vereinfacht. Zudem ermöglicht das Format Datensätze automatisch zu generieren, validieren und anschließend zu dokumentieren [28]. Diese werden dem Nutzer dann zur Verfügung gestellt. Es steht als Open Source Vorlage zur Verfügung und kann von jedem genutzt werden. Allerdings ist in CPACS die Kabinenauslegung nur bedingt abgebildet. Es können nur Sitzblöcke sowie die Monumente wie Toiletten und Küchen platziert werden. Detailliertere Angaben, wie z.B. die Platzierung der PSUs, sind nicht möglich. [28, 29]

## PadLab von der TU Berlin

PadLab (Preliminary Aircraft Design Laboratory) ist eine aufbauend auf mehreren Studien- und Abschlussarbeiten an der Technischen Universität Berlin entwickelte Umgebung für das vorläufige Flugzeugdesign. Dabei handelt es sich um ein auf MATLAB<sup>®</sup> basierendes Programm, welches über eine Benutzeroberfläche (GUI) bedient werden kann. Der Schwerpunkt bei PadLab liegt darauf, dass innerhalb kürzester Rechenzeit die verwendeten Methoden für den Flugzeugentwurf zu einem konvergierten Designergebnis führen. Damit lassen sich unter anderem die aerodynamische Leistung bestimmen, das Nutzlast-Reichweiten-Diagramm für ein gewähltes Design ausgeben oder eine Kabinenauslegung durchführen. Abbildung 3.16 zeigt ein exportiertes Flugzeugdesign mit gewählten Kabinenlayout. [30]

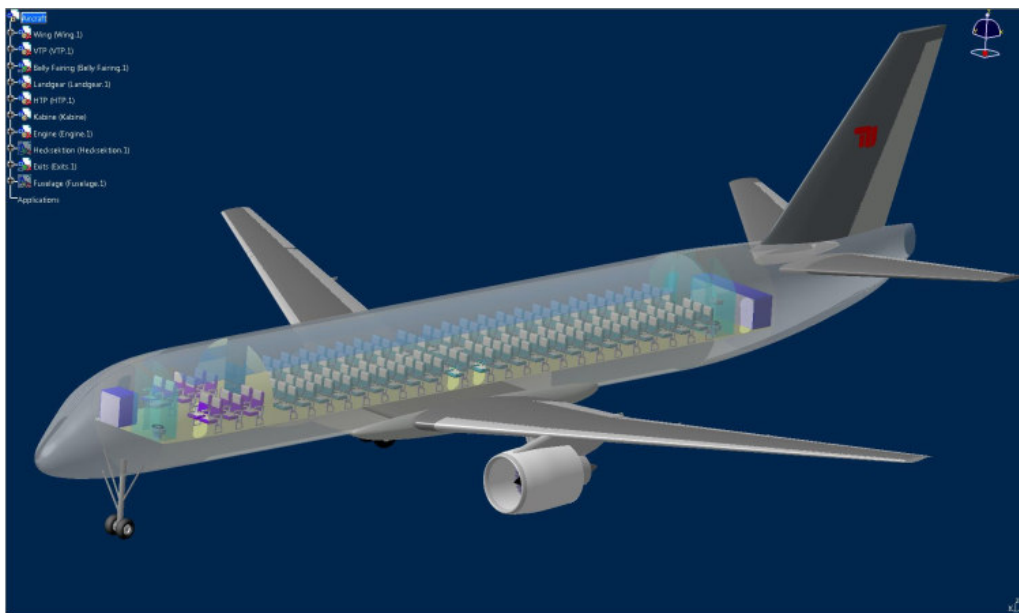


Abbildung 3.16: Flugzeugmodell in CATIA mit Kabinenlayout von PadLab [30]

Neben der Entwurfssynthese können parametrische Untersuchungen hinsichtlich der Zielfunktionskosten (engl.: *Direct Operating Costs*, DOC) oder der Zielfunktion für das Höchstabfluggewicht (engl.: *Maximum take off weight*, MTOW) durchgeführt werden [30]. Zusätzlich können über Schnittstellen die Ergebnisse visualisiert und z.B. das erzeugte geometrische Modell in CATIA exportiert werden. Vergleichbar zu CPACS können bei der Kabinenauslegung ebenfalls nur die Platzierung der Sitze und Monumente variiert werden. Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik soll daher die Kabinenauslegung mehr in den Fokus rücken und eine detailliertere Auslegung mit Hilfe von weiteren Modellen sowie eine Bewertung des gewählten Layouts ermöglichen.



## 4. Modellbasierte Auslegung von PSU-Funktionen

In diesem Kapitel wird der Modellbasierte Ansatz für die Anordnung der PSU-Funktionen in der Kabine genauer beschrieben und die verwendeten Modelle vorgestellt. Des Weiteren werden die Herangehensweise und der Aufbau der für die Bewertung verschiedener Konzepte der PSU zugrundeliegenden Programmierung erläutert.

### 4.1 Modellbasierter Ansatz

In der Entwicklung von komplexen technischen Produkten werden hohe Anforderungen an den Produktentwicklungsprozess gestellt. Die Entwicklungszeiten werden stetig kürzer und die Systemarchitekturen immer komplexer. Der modellbasierte Lösungsansatz kann daher als Brücke dienen und die verschiedenen Ingenieursdisziplinen miteinander verbinden. Die Vorteile, die bei einem solchen Ansatz erwartet werden, sind eine verbesserte Kommunikation zwischen den System-Entwicklern, ein vermindertes Entwicklungsrisiko sowie eine Steigerung der Qualität und Produktivität [17].

Die Auslegung der Flugzeugkabine bzw. der PSU-Funktionen stellen ein komplexes System dar und bietet daher für die Nutzung von MBSE eine gute Voraussetzung. Das Model-based Systems Engineering stellt dem Anwender Modelle und Elemente zur Verfügung, mit dem Ziel, die Anforderungen und Randbedingungen ihrer Wechselwirkungen zu modellieren. Somit kommen mit der Methode wichtige Beziehungen zwischen den einzelnen Modellen zum Vorschein, wodurch die Nachvollziehbarkeit steigt und Optimierungspotenziale sichtbar werden. Wie bereits im Kapitel 3 aufgezeigt, gibt es bei der Nutzung der PSU-Funktionen diverse Wechselwirkungen mit anderen Systemen und die Interaktion mit dem Passagier. Die angewandte Methodik bildet diese ausreichend genau ab und ermöglicht das Erstellen sowie eine anschließende Bewertung unterschiedlicher PSU-Konzepte.

Um den modellbasierten Ansatz zur Auslegung der Passagier Service Einheit umzusetzen, werden die folgenden sechs Methoden verwendet. Diese charakterisieren das Gesamtsystem der PSU.

- Geometriemodell
- Ontologiemodell
- Funktionalitätenmodell
- Montagekostenmodell
- Modell Mensch
- Anforderungsmodell

Das Geometriemodell wird für die Visualisierung der Kabinenstruktur und den Aufbau der PSU erstellt. Zudem liefert dieses die Randbedingungen für die Platzierung der Passagier Service Einheiten durch die Vorgabe der Abmaße des Passagier Service Kanals. Aufbauend auf diesen Daten lässt sich in einem weiteren Modell die Ontologie des Gesamtsystems ableiten. Mithilfe der Ontologie lassen sich die Wechselwirkungen und Hierarchien der Komponenten zueinander beschreiben und darstellen. Ein Funktionalitätenmodell wird für die Darstellung von Schnittstellen zu anderen Teilsystemen der Kabine oder für die Interaktion mit dem Passagier benötigt. Diese sind zum Beispiel die elektrische Versorgung einzelner Funktionen innerhalb der PSU sowie die Übermittlung von digitalen Signalen. Auf Basis dieser drei Modelle kann somit die Struktur erfasst und dargestellt werden. Um eine regelbasierte Anordnung der Passagier Service Funktionen umzusetzen und anschließend zu bewerten, werden weitere Modelle benötigt. Zum einen wird ein Montagekostenmodell erstellt, mit dem potentielle Einsparungen bei der Vormontage erfasst werden können. Zum anderen wird für die Betrachtung des Passagierkomforts ein Modell des Menschen herangezogen. Die Erreichbarkeit, das Hör und Seh-Vermögen sowie das Empfinden des Passagiers dienen zur Ableitung einer Zielfunktion, die ebenfalls bei der Auslegung der PSU-Funktionen berücksichtigt werden muss. Abschließend dient das Anforderungsmodell dazu, Wünsche und Ziele des Stakeholders mit einzubeziehen und diese bei der Platzierung der PSU-Funktionen mit einfließen zu lassen (z.B. hoher Passagierkomfort). Dabei werden die Daten von den zwei Modellen für den Menschen und die Montagekosten herangezogen. Mithilfe der Objektorientierten Programmierung werden die oben genannten Modelle in MATLAB<sup>®</sup> erzeugt und miteinander verknüpft. Durch den objektorientierten Ansatz lässt sich die generierte Wissensdatenbank (engl.: *Knowledge-Based Engineering*, KBE) in einer kompakten

Weise zusammenfassen und ermöglicht mittels Schnittstellen das Anbinden an weitere Programme/Software. In Abbildung 4.1 ist die Verkettung der genannten Modelle miteinander schematisch dargestellt. Mit Hilfe der KBE kann dann die PSU innerhalb der Kabine platziert, bewertet und anschließend in einem 3D-Modell in MATLAB<sup>®</sup> grafisch dargestellt werden. Zusätzlich kann das erstellte 3D-Modell in ein STL-File (engl.: *Standard Triangulation Language*) exportiert werden. Die Grafiksoftware *Blender*<sup>®</sup> oder diverse CAD-Programme (engl.: *Computer-aided Design*) können dann die generierten Daten für die Kabine weiterverarbeiten [31].

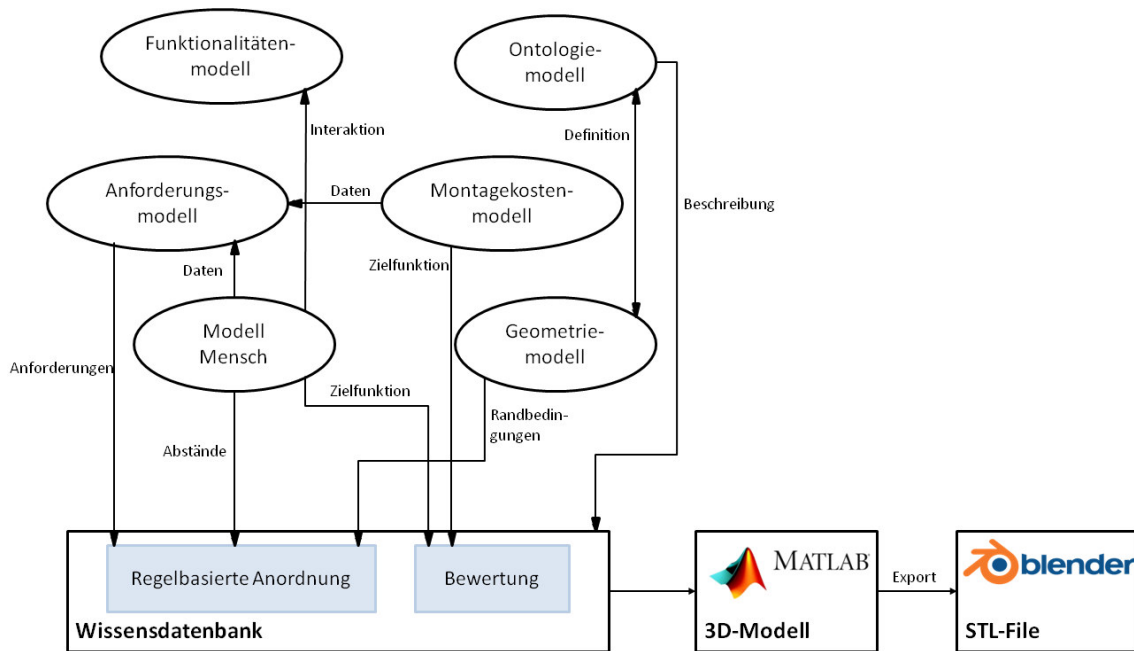


Abbildung 4.1: Verkettung der angewandten Modelle für die Auslegung der PSU

Im Folgenden werden die zu verwendenden Modelle vorgestellt und die jeweils getroffenen Annahmen erläutert.

## 4.2 Modell Mensch

Bei der Auslegung der Passagier Service Einheit spielen die körperlichen Abmaße des Menschen eine entscheidende Rolle. Mit einem Modell des Menschen kann z.B. die Erreichbarkeit der Lichtschalter überprüft und eine Aussage zum Komfort des Passagiers getroffen werden. Das Deutsche Institut für Normung e.V. hat in einer weltweiten Untersuchung die wesentlichen Maße des menschlichen Körpers für die technische Gestaltung festgehalten. Die CEN-ISO TR 7250 enthält die anthropometrischen Datenbanken einzelner nationaler Bevölkerungen und wird im Folgenden verwendet [32]. Für die Betrachtung der PSU in der Kabine werden die Maße eines europäischen Menschen zugrunde gelegt.

Tabelle 4.1 zeigt die benötigten Maße, die für die Bewertung verwendet werden. Dabei werden nur die Maße des Mittelwerts aus der statistischen Zusammenstellung der Werte verwendet. Damit ist gewährleistet, dass die Ergonomie für den durchschnittlichen Menschen gut ausgelegt ist.

Bezeichnung	Deutschland Wert [mm]
Augenhöhe, sitzend	765
Schulterhöhe, sitzend	600
Reichweite nach vorn, Griffachse	740

Tabelle 4.1: Verwendete Körperabmaße aus der DIN-Norm [32]

Die Abbildungen 4.2a und 4.2b zeigen eine Sitzreihe in der Flugzeugkabine. Die grünen Punkte zeigen die gemittelte Referenzposition der Augen des Passagiers. Die hellblauen Punkte geben die Position der Schulter an und die Roten definieren den Sitzbezugspunkt (engl.: *Seat Reference Point*, SRP). Zudem wird die Griffachse des europäischen Menschen durch die Punktwolken in blau abgebildet. Mithilfe dieser Werte können im nächsten Schritt die Modelle für die Bewertung der Funktionen der PSU erstellt werden.

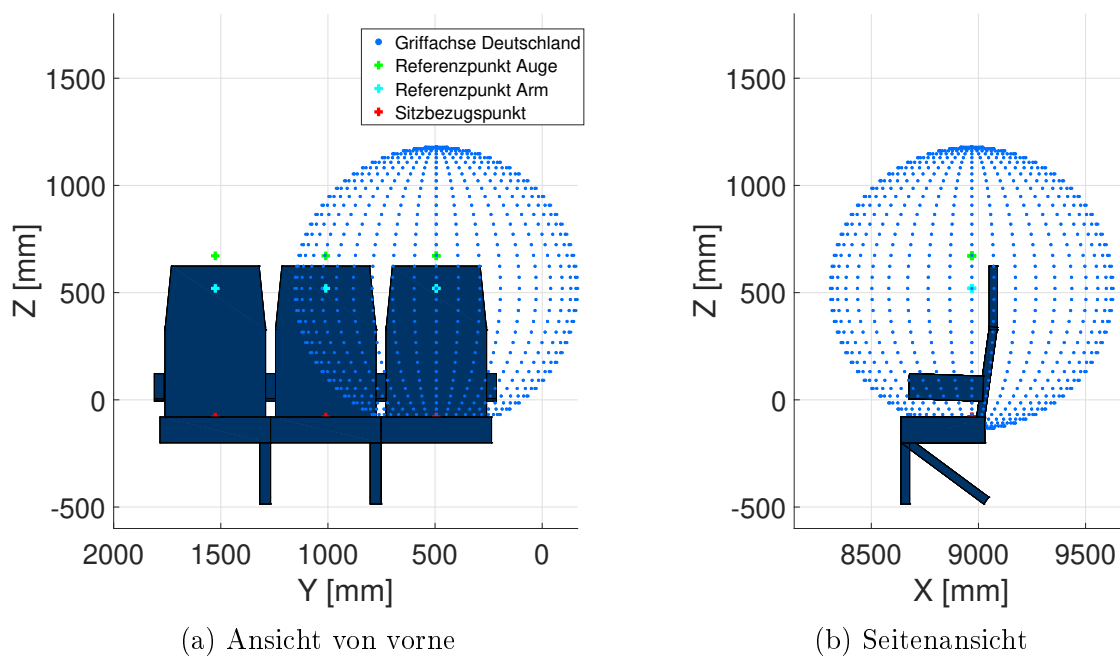


Abbildung 4.2: Modell Mensch mit Sitzen und Referenzpunkten in der Kabine

#### 4.2.1 Geometrische Abhängigkeiten zwischen Mensch und PSU

Die Bewertung der PSU-Konzepte wird mit verschiedenen Zielfunktionen durchgeführt. Dabei werden vorwiegend die geometrischen Anforderungen an die PSU-

Funktionen bewertet, die sich aus den Annahmen für Geometrie des Menschen ergeben. Zudem werden weitere Eigenschaften des Menschen wie Empfindungs-, Seh- und Hörvermögen berücksichtigt. Jede Funktion in der Serviceeinheit muss unterschiedliche Anforderungen erfüllen und wird daher über eine eigene Zielfunktion ausgewertet. Im folgenden Abschnitt werden diese vorgestellt.

### Erreichbarkeit der Sauerstoffmasken

Die Sauerstoffmasken sind sicherheitskritisch und müssen zudem schnell vom Passagier erreichbar sein. Daher wird der maximale Abstand  $a_{max,S}$  zwischen Sauerstoffmaske und Passagier auf die Griffachse  $m_G$  begrenzt. Eine weitere Beschränkung wird durch den minimalen Abstand definiert. Um die Kopffreiheit zu gewährleisten begrenzt z.B. AIRBUS den Mindestabstand auf  $a_{min,S} = 2''$  [33]. Dieser wird für die weitere Betrachtung ebenfalls angewendet. Gleichung 4.1 zeigt die Annahmen für die Bewertung.

$$\begin{aligned} a_{max,S} &= m_G \\ a_{min,S} &= 2'' \end{aligned} \tag{4.1}$$

Der Abstand zwischen den Sauerstoffmasken und den Sitzen wird individuell berechnet. Als Referenzpunkte werden zum einen der Mittelpunkt der Sauerstoffmasken und zum anderen der Schulterreferenzpunkt des Menschen verwendet.

### Sprachverständlichkeit in der Kabine

Für die Bewertung der Akustik von den Lautsprechern im Flugzeug werden verschiedene Annahmen zugrunde gelegt. Nach KOCHAN [34] beträgt die Grundlautstärke in einer Flugzeugkabine zwischen 75 und 80 dB. Die Kabinenakustik wird vorwiegend durch die Triebwerke und die Hintergrundgeräusche aus der Galley bestimmt. Damit trotz der Störgeräusche in der Kabine die Lautsprecherdurchsagen verständlich bleiben, muss der Nutzschaallpegel mindestens 10 dB über dem Störschaallpegel liegen [35].

$$L_{p,erf} = L_{kenn} + L_{p,SS} + z_{Lp} + 10 \tag{4.2}$$

Um eine Aussage über einen angemessenen Abstand zwischen Passagier und Lautsprecher zu treffen, wird die Gleichung 4.2 verwendet. Der erforderliche Schalldruckpegel  $L_{p,erf}$  eines Lautsprechers setzt sich aus dem Kennschalldruckpegel  $L_{kenn}$  und dem Störgeräuschpegel  $L_{p,SS}$  zusammen. Durch die Schalldruckpegelzunahme  $z_{Lp}$ ,

die abhängig von der Leistung des Lautsprechers ist, wird der Wert zusätzlich erhöht. Die Tabelle 4.2 zeigt die Schalldruckpegelabnahme abhängig von Abstand zwischen Quelle und Empfänger. Im Rahmen dieser Arbeit wird angenommen, dass die Lautsprecher in einem Abstand zwischen 0 bis 4 m zum Passagier eingebaut werden. Die Abnahme lässt sich dadurch als annähernd linear beschreiben und beträgt  $A=0,33 \frac{dB}{m}$ .

Abstand [m]	-	2	4	6
Abnahme [dB]	0	6	12	16

Tabelle 4.2: Schalldruckpegelabnahme abhängig vom Abstand zur Quelle [35]

Umformen der Gleichung 4.2 und einsetzen der linearen Annahme zur Abnahme des Schalldruckpegels ergeben den maximalen Abstand, den der Lautsprecher vom Passagier entfernt sein darf, ohne Einbuße in der Sprachverständlichkeit zu erzeugen.

$$a_{max,A} = [A \cdot (L_{kenn} - L_{p,SS} + z_{Lp} - 10)] \cdot S \quad (4.3)$$

Gleichung 4.3 zeigt die zugehörige Berechnung. Da es sich bei den Lautsprechern zusätzlich um ein sicherheitskritisches System handelt, wird der berechnete Abstand zusätzlich durch einen Sicherheitsfaktor von  $S = 0,9$  reduziert. Für die Bewertung wird der tatsächliche Abstand zwischen dem Mittelpunkt des Lautsprechers und dem Augenreferenzpunkt des Menschen des jeweiligen Sitzes ermittelt.

### Lesbarkeit der Hinweiszeichen

Die Größe der Hinweiszeichen hängt vom Sehabstand, der verwendeten Zeichengröße und dem Auflösungsvermögen des menschlichen Auges ab. Genaue Untersuchungen von Bildschirmarbeiten zeigen, dass bei einem Sehwinkel von 22 Bogenminuten ein zuverlässiges und schnelles Lesen von Schriftzeichen gewährleistet ist [36]. Bei einer Sehentfernung  $a_{Norm,Z}$  von 500 mm führt dies zu einer genormten Zeichengröße  $h_{Norm}$  von 3,2 mm. Unter Anwendung des Strahlensatz kann damit der maximale Abstand für die gewählte Zeichengröße der Hinweiszeichen zum Passagier berechnet werden.

$$a_{max,Z} = \frac{h_Z}{h_{Norm}} \cdot a_{Norm,Z} \cdot S \quad (4.4)$$

Gleichung 4.4 zeigt die Berechnung der Zielgröße des maximalen Abstands für die Hinweiszeichen  $a_{max,Z}$ . Da es sich dabei um eine gesetzliche Anforderung handelt, wird zusätzlich ein Sicherheitsfaktor von  $S = 0,9$  mit eingerechnet. Die Berechnung

des tatsächlichen Abstandes eines gewählten Konzepts erfolgt zwischen dem Referenzpunkt des Auges und dem Mittelpunkt der Hinweiszeichen. Dieser Wert kann dann anschließend mit dem maximalen Wert verglichen werden.

### Erreichbarkeit und Luftstromgeschwindigkeit der indiv. Belüftung

Die Belüftung in der Kabine lässt sich mit der Berechnung des Ähnlichkeitsbereichs eines Freistrahls abbilden. Dabei strömt aus einer Düse eine Strömung in eine freie Umgebung ohne Wandberechnung. Tritt ein Luftstrahl aus einer kreisrunden Düsenöffnung mit dem Durchmesser  $d_0$  aus, so besitzt er an der Austrittsstelle ein rechteckiges Geschwindigkeitsprofil mit einer gleichen Geschwindigkeit von  $v_0$ , das sich mit Entfernung von der Öffnung zu einem Gaußprofil ausbildet. Zudem nimmt die Geschwindigkeit des ausströmenden Fluids dabei mit zunehmendem axialen Abstand  $x$  von der Düsenöffnung hyperbolisch ab. Gleichung 4.5 zeigt den genannten Zusammenhang. [37]

$$v(x) = v_0 \cdot \frac{d_0}{0.32 \cdot x} \quad (4.5)$$

Das Zugluftempfinden des Menschen ist vorwiegend von der Luftgeschwindigkeit und der Art der Tätigkeit abhängig. Während des Aufenthalts in der Flugzeugkabine werden daher Luftgeschwindigkeiten  $v$  zwischen 0,15 und 0,25 m/s als angenehm empfunden [38]. Höhere Luftgeschwindigkeiten verursachen Zugluft, während zu geringe Geschwindigkeiten nicht den gewünschten Effekt einer guten Belüftung erzielen. Individuelle Luftauslässe in den heutigen Flugzeugen weisen eine Luftaustrittsgeschwindigkeit von  $v_0 = 1,0 \text{ m/s}$  auf [39]. Einsetzen dieses Wertes in die Gleichung 4.5 ergibt den Graph in Abbildung 4.3 für die Abnahme der Luftgeschwindigkeit bei voll geöffneter Düse. Die blaue Linie zeigt die Abnahme der Luftgeschwindigkeit mit der Entfernung zur Austrittsquelle. Im grün markierten Bereich befinden sich die Werte, die vom Menschen als angenehm empfunden werden. AIRBUS beschränkt den maximalen  $x$ -Abstand vom Referenzpunkt des menschlichen Auges zur Luftdüse auf 10 ". Anwendung des Satz des Pythagoras ergibt damit eine maximale Entfernung der Düse zum Passagier von  $a_{max,L} = 0,479 \text{ m}$ . Dieser ist als roter Punkt im Graph geplottet.

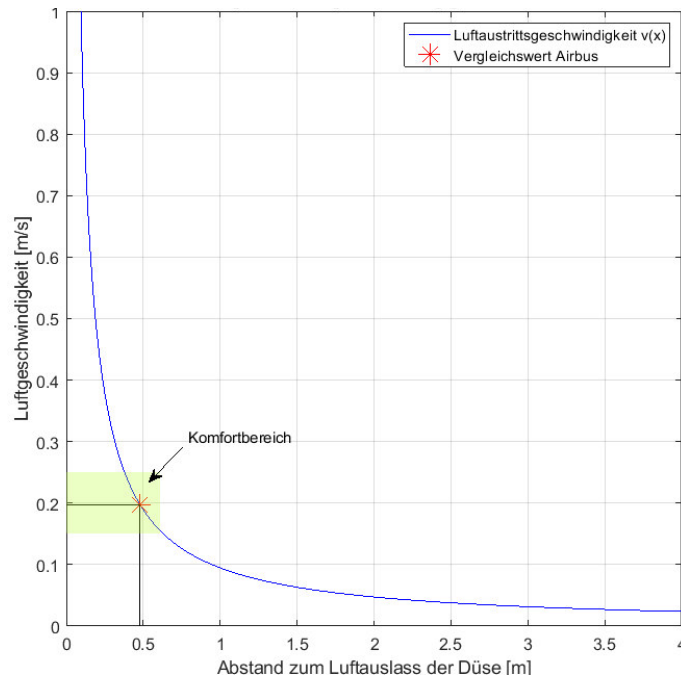


Abbildung 4.3: Luftaustrittsgeschwindigkeit abhängig von der Entfernung zur Düsenöffnung

Der Vergleichswert von AIRBUS für die maximale Entfernung zur indiv. Belüftung befindet sich im Komfortbereich und bestätigt damit, dass die gewählte Funktion als Berechnungsgrundlage für die Bewertung der Belüftungsfunktion angewendet werden kann. Umformen der Funktion nach  $x$  und Einsetzen der Luftgeschwindigkeiten zwischen  $v = 0,15$  und  $0,25$  m/s ergeben einen Intervall für die optimale Entfernung abhängig vom neu gewählten Konzept der Luftdüse.

$$x = v_0 \cdot \frac{d_0}{0.32 \cdot v} \quad (4.6)$$

Neben der Berechnung der Luftgeschwindigkeiten spielt die Erreichbarkeit der Düsen eine Rolle. Allerdings beträgt die Greifweite des europäischen Menschen 740 mm und ist damit vom Betrag her größer als die maximale Entfernung der Düsen vom Passagier die von AIRBUS empfohlen wird. Für die Bewertung und Auslegung wird daher die Freistrahlberechnung angewendet. Der tatsächliche Abstand wird zwischen dem Mittelpunkt der Luftdüsen und dem Augenreferenzpunkt gemessen.

### Erreichbarkeit der Leselichter

Die Leselichter dienen dem Komfort des Passagiers und unterliegen keinen sicherheitsrelevanten Anforderungen. Daher wird der maximale Abstand zwischen Mensch und PSU-Funktion durch die Erreichbarkeit des Lichtschalters definiert.

$$a_{max,B} = m_G \quad (4.7)$$



Gleichung 4.7 zeigt die Annahme für den maximalen Abstand zwischen dem Referenzpunkt der Schulter und dem Mittelpunkt des Lichtschalters für die individuelle Beleuchtung.

### Erreichbarkeit des Flugbegleiterrufs

Die Erreichbarkeit des Flugbegleiterrufs wird ebenfalls über den Abstand zwischen dem Schulterreferenzpunkt und dem Mittelpunkt des Rufknopfs bestimmt. Dieser unterliegt keinen gesetzlich vorgeschriebenen Anforderungen für die Platzierung in der Kabine.

$$a_{max,F} = m_G \quad (4.8)$$

Der maximale Abstand sollte daher aus Komfortgründen für den Passagier nicht mehr als die Griffachse des Menschen betragen. Gleichung 4.8 zeigt den genannten Zusammenhang.

### Sichtbarkeit der IFE-Bildschirme

Die Sehschärfe des menschlichen Auges variiert mit dem Alter des Menschen und wird in Winkelminuten gemessen. Die durchschnittliche Auflösung beträgt 1 Winkelminute und entspricht einer Ortsauflösung von etwa 1,5 mm bei 5 m Abstand. Für die Berechnung des optimalen Abstands zwischen dem Passagier und den Bildschirmen des In-flight Entertainments wird die Daumenregel der Netzhautbildgröße unter Annahme eines linearen Verhaltens angewendet. Diese sagt aus, dass der maximale Abstand, um ein Bild scharf wahrnehmen zu können, bei einem Display von  $D_N=4$  " ungefähr  $a_{N,I}=600$  mm beträgt [40].

$$a_{max,I} = \frac{D_I}{D_N} \cdot a_{N,I} \quad (4.9)$$

Der maximale Abstand zum Bildschirm  $a_{max,I}$  kann mit Gleichung 4.9 bestimmt werden. Die Diagonale des Bildschirms wird dabei ebenfalls in Zoll angegeben. Der tatsächliche Abstandswert für einen späteren Vergleich wird zwischen dem Referenzpunkt des Auges und dem Mittelpunkt des IFE-Bildschirms berechnet. Neben dem maximalen Abstand muss der Bildschirm aus Sicherheitsgründen ebenfalls einen Mindestabstand zum Kopf des Passagiers einhalten. Die Kopffreiheit des Passagiers ist dann gewährleistet, wenn bei einem Unfall dieser um seinen Sitzbezugspunkt herum sich drehen kann ohne dabei mit dem Kopf gegen einen Gegenstand zu stoßen. Der minimale Abstand zwischen Bildschirmmittelpunkt und Augenreferenzpunkt beträgt daher

$$a_{min,B} = 136 \text{ mm.} \quad (4.10)$$

### 4.2.2 Aufstellen der Zielfunktion

In einer Zielfunktion  $Z_{ges}$  werden die Ziele des Entscheidungsträgers hinsichtlich des Passagierkomforts festgehalten und eine Aussage über die Güte des zu untersuchenden Konzepts ermöglicht. Mit dieser soll ein Optimum für die Platzierung der PSU-Funktionen in der Kabine gefunden werden aufbauend auf der Anforderung, dass der Abstand zwischen PSU und dem Menschen minimiert wird. Dafür werden im ersten Schritt die einzelnen Zielfunktionen  $Z_i$  der geometrischen Modelle basierend auf dem Menschen aus Abschnitt 4.2.1 aufgestellt. Dabei werden die tatsächlichen Abstände der jeweiligen Sitze  $a_{tat,i}$  zu der zugehörigen Funktion der PSU ermittelt und aufsummiert. Anschließend wird der Wert durch die Anzahl der Sitze  $n_S$  in der Kabine geteilt und der gemittelte Abstandswert bestimmt. Dieser wiederum kann durch den ermittelten maximalen Abstandswert aus Abschnitt 4.2.1 geteilt werden. Gleichung 4.11 zeigt den Zusammenhang für alle einzelnen Zielfunktionen. Die Variable  $i$  steht hierbei für die jeweiligen Funktionen der PSU (S,A,Z,L,B,F,I), die bereits im Abschnitt 4.2.1 verwendet wurden.

$$Z_i = \frac{\frac{\sum a_{tat,i}}{n_S}}{a_{max,i}} \quad (4.11)$$

Mit Gleichung 4.12 werden alle einzelnen Zielfunktionen aufsummiert, sowie der gemittelte Gesamtwert bestimmt. Ist das Ergebnis gleich dem Wert eins, erfüllt das Konzept den maximalen Abstand der jeweiligen Funktion. Liegt der Wert darüber, übersteigen die Abstände die gewünschten Anforderungen und das Konzept gewährleistet nicht die benötigten Anforderungen und Sicherheitskriterien. Befindet sich der Wert jedoch unter eins, so sind die Anforderungen an die maximalen Abstände erfüllt und ein Optimum kann gefunden werden.

$$Z_{ges} = \frac{\sum Z_i}{7} \quad (4.12)$$

Damit ist die Definition des Modells eines Menschen für die Bewertung verschiedener Konzepte in der Kabine abgeschlossen. Mit diesen Zusammenhängen kann eine ausreichende Bewertung des Passagierkomforts vorgenommen werden und im nächsten Schritt wird das Vorgehen für die Bewertung der Montagekosten erläutert.

## 4.3 Montagekostenmodell

Zusätzlich zum geometrischen Modell des Menschen und der dazugehörigen Abstandsbeurteilung wird ein Kostenmodell zur Bewertung der neuen Szenarios angewendet. Dabei wird speziell auf die Bewertung der Montage eingegangen und damit zusammenhängende Einsparpotenziale aufgezeigt. Für einen Einbau der PSU während der Vormontage sprechen die folgenden Vorteile:

- Bessere ergonomische Bedingungen
- Keine Beschränkung durch Einbauräume
- Totzeiten werden vermieden
- Kosteneinsparungen

Durch eine Vormontage der Passagier Service Einheiten in die Gepäckablagen müssen diese nicht erst in der Endmontage (engl.: *Final-Assembly Line*, FAL) im Flugzeug eingebaut, sondern können bereits vorher verbaut werden. Dadurch erfolgt die Arbeit für den Monteur Rücken schonender und ergonomisch unter besseren Bedingungen. Die Monteure arbeiten bei der Vormontage entweder im Stehen oder im Sitzen an einer Fertigungsinsel. An dieser sind bereits die einzelnen Bauteile vorgelegt und die benötigten Werkzeuge liegen bereit. Zudem besteht die Möglichkeit das Bauteil entsprechend der Einbausituation auszurichten. Im Gegensatz dazu ist die Bewegungsfreiheit in der Kabine eingeschränkt. Erfahrungen zeigen, dass es nur auf rund ein Fünftel der Kabinenfläche möglich ist, stehend zu arbeiten. Das Anbringen der Passagier Service Einheiten erfolgt über Kopf und belastet dadurch den Monteur zusätzlich bei der Montage. Des Weiteren sind die Einbauräume und der Zugang zur Kabine durch die Maße der Türen und den geringen Raum in der Kabine beschränkt. Bei einem externen Zusammenbau entfallen diese Einschränkungen. Neben den ergonomischen Arbeitsaspekten für den Menschen bei der Endmontage spielt das potenzielle Einsparpotenzial bereits während der Zulieferkette eine weitere Rolle. Abbildung 4.4 zeigt beispielhaft diesen Zusammenhang. Als Zulieferkette wird dabei die Struktur der Lieferanten bis hin zum Produzenten des Endproduktes bezeichnet. Letzterer wird auch als Systemintegrator oder OEM (engl.: *Original Equipment Manufacturer*) bezeichnet und übernimmt die Endmontage des Produktes. Dieser beschafft Produkte von wenigen Systemlieferanten, welche wiederum selbst von Modullieferanten Produkte beschaffen. Als Tier 1 werden Zulieferer bezeichnet, die Systeme bereitstellen [41]. Als Tier 2 werden wiederum Zulieferer von Subsystemen oder Komponenten bezeichnet [13].

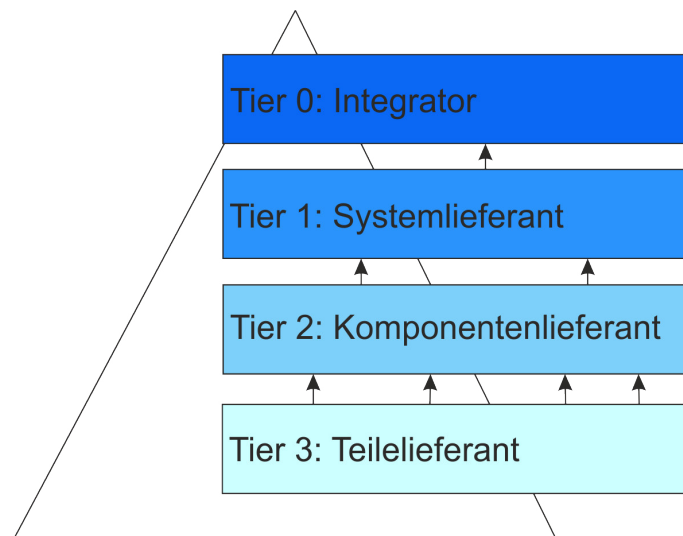


Abbildung 4.4: Vereinfachte Darstellung der Zulieferkette bei Verkehrsflugzeugen nach [13]

Abhängig vom Abstand zum OEM werden die Lieferanten als Tier-n-Lieferanten betitelt und spiegeln die Sublieferantenstruktur wider. AIRBUS stellt als Flugzeugbauer den Integrator dar (Tier 0) und zählt eine Vielzahl an Unternehmen zu der ersten Zuliefergruppe [13]. Die enge Verzahnung zwischen OEM und den einzelnen Tier-Lieferanten stellt besondere Herausforderungen an die Prozesse. Insbesondere vor dem Hintergrund von Just-in-Time-Prozessen wird die effiziente Kommunikation und Bereitstellung von Modulen, Komponenten und Einzelteilen immer mehr zum erfolgskritischen Faktor [41]. Die Fertigung ist bisher vom handwerklichen Geschick der Mitarbeiter geprägt. AIRBUS möchte daher im Rahmen von Industrie 4.0 die Lieferkette (engl.: *Supply Chain*) neu gestalten. Idealere Wege in der Lieferkette und eine bessere ergonomische Gestaltung der Arbeitsplätze sind dabei zwei relevante Aspekte [42]. Dies ist nur durch eine enge Zusammenarbeit zwischen einem Lieferanten und einem Abnehmer zu erreichen. Im Ergebnis soll der Gesamtprozess schlanker, die Durchlaufzeiten und das Lagerrisiko reduziert und damit für alle Beteiligten kostengünstiger werden. Ein Ansatz hierfür könnte eine bereits erfolgte Vormontage der PSU in die Gepäckablagen darstellen. Dadurch entfällt eine einzelne separate Anlieferung der PSU an den Systemintegrator und ermöglicht eine daraus resultierende Durchlaufverkürzung der Endmontage. Die Flugzeughersteller bekommen dann nicht mehr nur Komponenten zugeliefert, sondern vielmehr Baugruppen oder Subsysteme bereitgestellt.

Ein weiterer Aspekt, der für die Vormontage der PSU spricht, ist die Vermeidung von Totzeiten. Aufgrund der geringen zur Verfügung stehenden Fläche für die Durchführung der Montage in der Flugzeugkabine können nicht weitere Arbeiten parallel ausgeführt werden, sondern müssen nacheinander stattfinden. Eine Vormontage würde die Zeiten in der Endmontage reduzieren, da die Elemente bereits verbaut wurden.

Dadurch wäre die Zeit insgesamt kürzer, könnte anderweitig eingesetzt werden und schlussendlich die Kosten reduzieren.

Die genannten Zusammenhänge sind in der folgenden Zielfunktion festgehalten (Gleichung 4.13). Sie beschreibt die Arbeitszeit, die zum Einbau der PSU benötigt wird. Diese wird in dieser Arbeit proportional zu den Kosten für die Montage angenommen und beschreibt damit potenzielle Kosteneinsparungen für zu untersuchende Kabinenkonzepte.

$$Z_K = P \cdot \{t_T + t_p + t_L + t_S + t_{a,p} + t_{a,L} + t_{a,S} + t_f\} \cdot \frac{(1 + N)}{100} \quad (4.13)$$

Mit der Gleichung 4.13 wird die benötigte Zeit [h] ermittelt, die für den Einbau sämtlicher Passagier Service Einheiten in den Versorgungskanal der Gepäckablagen benötigt wird. P definiert die Anzahl der in der Kabine vorhandenen PSUs und  $t_i$  die Zeit zur Durchführung einzelner Arbeitsschritte. Zum einen sind dies der Transport der Passagier Service Einheiten in die Kabine  $t_T$  und das Einhängen dieser. Das Gesamtsystem PSU wird dabei in drei Paneele unterteilt. Ein Panel beinhaltet die Hinweiszeichen, den Lautsprecher, den Flugbegleiterruf und die Leselichter  $t_p$ . Die zwei weiteren sind die individuelle Belüftung  $t_L$  und die Sauerstoffbox mit den Masken  $t_S$ . Zum anderen der Anschluss der Signal- und Stromkabel für die PSU  $t_{a,p}$  und die Sauerstoffbox  $t_{a,S}$  sowie der Anschluss des Schlauchs an den Versorgungskanal für die individuelle Belüftung  $t_{a,L}$ . Außerdem werden zwischen den PSUs Füllleisten  $t_f$  eingebaut, um den offenen Passagier Service Kanal zu schließen und optisch zu verkleiden. [3]

Die Zeit der einzelnen Arbeitsschritte wird in Industrieminuten (IM) angegeben, 100 IM entsprechen einer Stunde. Daher wird der ermittelte Wert anschließend durch 100 geteilt und in die Einheit Zeitstunde umgerechnet. Unterschieden wird innerhalb der Berechnung zwischen einem Einbau während der Vor- oder Endmontage mittels eines Faktors N, dem Non-Value Adding Wert. Dieser berücksichtigt Aktivitäten, wie die Inspektion, das Nacharbeiten oder das Holen von Werkzeug, die zusätzlich zum direkten Einbauvorgang mit betrachtet werden müssen. In der Endmontage beträgt der N-Faktor zwischen 50-80 %. In dieser Arbeit wird ein Wert von  $N=0,7$  für die Endmontage und  $N=0,2$  für die Vormontage angenommen.

## 4.4 Klassenbasierter Ansatz in MATLAB<sup>©</sup>

Das Geometrie-, Funktionalitäten- und Ontologiemodell werden mit Hilfe der objektorientierten Programmierung erzeugt. In dieser Methodik der Softwareentwicklung werden Zusammenhänge zwischen Daten und Algorithmen in Form von Objekten

dargestellt. Dies wird in dem Abschnitt 2.3 genauer erläutert. Für die Programmierung wird die kommerzielle Software MATLAB<sup>®</sup> verwendet. Diese eignet sich gut für die numerische Lösung von Problemen und bietet umfangreiche Grafikfunktionen für die Darstellung der Ergebnisse. Zudem bietet die Software aus der objektorientierten Programmierung die Konzepte von Klassen und Vererbung [43].

#### 4.4.1 Kabinengeometriemodell

Im Rahmen dieser Arbeit wird der modellbasierte Lösungsansatz untersucht. Daher werden für die Beschreibung der Programmierung die Diagramme der Modellierungssprache UML für Software und Systeme verwendet. UML verwendet Objekte und verknüpft diese auf unterschiedliche Art und Weise miteinander, wie bereits im Abschnitt 2.2 vorgestellt. Damit werden Modelle geschaffen, die beim Verständnis der Prozessabläufe unterstützen sowie die Beziehungen und Abhängigkeiten untereinander besser darstellen [44].

Zur besseren Verwaltung der vielen Objekte wird das Konzept der Klassen angewandt. Die Klassen dienen als Vorlage für gleichartige Objekte und erzeugen diese erst im Laufe der Programmierung. Als Basis wird die Klasse *Komponente* verwendet. Diese stellt verschiedene Eigenschaften und Funktionen eines Objekts bereit. Abgeleitete Klassen erben diese Methoden und Eigenschaften der Basisklasse und verhindern damit doppelten Programmieraufwand. Abbildung 4.5 zeigt den vereinfachten Aufbau des Programmcodes am Beispiel der Kabine sowie den Sitzen und

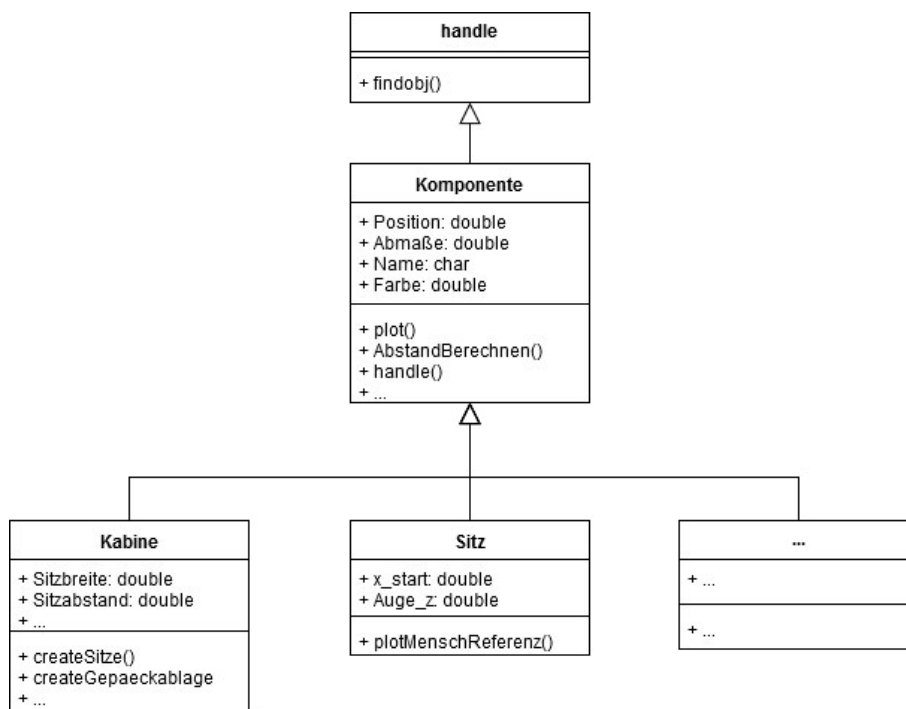


Abbildung 4.5: Vereinfachter Aufbau des Programmcodes für Klassen und Vererbung

gilt analog für alle weiteren Objekte in der Kabine. Von der Klasse *Komponente* erben die beiden Tochterklassen *Kabine* und *Sitz* die Basiseigenschaften. Diese sind unter anderem die Position, Farbe, Abmaße und Name. Zusätzlich werden auch die Funktionen, wie z.B. die Plot-Funktion für die grafische Darstellung oder Abstandsberechnungen für die Ermittlung der Zielfunktion aus Abschnitt 4.2.2, vererbt. Je nach Klasse beinhalten die Tochterklassen noch weitere Eigenschaften oder Funktionen, die speziell für deren zukünftige Objekte benötigt werden. In der Klasse der Sitze werden daher auch die Referenzpunkte für den Menschen abgespeichert und können darüber für jeden Sitz individuell angezeigt und für die Abstandsberechnung angewandt werden.

Neben der Vererbung zwischen den Klassen gibt es weitere Verbindungen, die die Beziehung zueinander verdeutlichen. Abbildung 4.6 zeigt ein vereinfachtes Klassendiagramm für den *Sitz*, die *Kabine*, das *Leselicht* und den *PSC*. Die Klasse *Kabine* besitzt eine Methode *createSitze()*, die Objekte der Klasse *Sitz* erzeugt. In dieser werden Daten vom Objekt der Kabine an den Sitz übergeben und entsprechende Sitzobjekte passend zum gewählten Kabinenkonzept erzeugt. Dies beschreibt die Aggregation und stellt damit die "ist-ein Teil-von"-Beziehung zwischen den Objekten/Klassen dar. Ähnlich verhält sich die Beziehung zwischen dem PSC und dem Leselicht. Die Klasse *PSC* besitzt ebenfalls eine Funktion, die ein Objekt vom Typ *Leselicht* erzeugt. Dabei wird neben bestimmten Parametern, wie Bauraum und Abmaße, auch der Erzeugername übergeben und als Initiator im neuen Objekt abgespeichert. Damit wird eine Verknüpfung erzeugt, die in dem Modell der Ontologie abgebildet werden kann (siehe Abschnitt 4.4.2). Das Leselicht wiederum steht auch in einer Beziehung zum Sitz, hier über die Assoziation dargestellt. Jeder Sitz hat genau ein zugewiesenes Leselicht und steht damit in einer Verbindung mit dem Objekt. Alle Einzelobjekte der Passagier Einheit Funktionen zusammengefasst bilden ein Gesamtobjekt, das der Passagier Service Einheit.

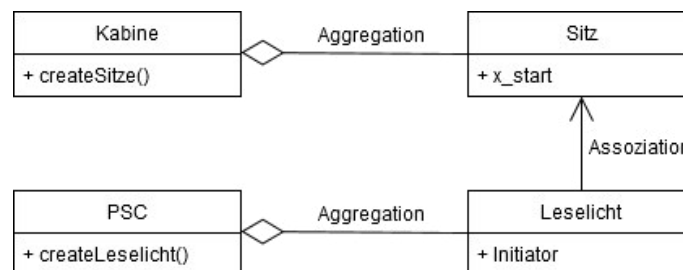


Abbildung 4.6: Vereinfachtes Klassendiagramm

Abbildung 4.7 zeigt einen Ausschnitt der Programmierung zur Erzeugung von Objekten, hier beispielhaft für die individuelle Belüftung dargestellt. Über die Eingabe von verschiedenen Parametern besteht die Möglichkeit, eine Vielzahl an Varianten

für die Platzierung und Geometrie eines Beleuchtungsobjekt zu erstellen. Der erste Eintrag beschreibt den Erzeuger des Objektes und definiert darüber auch den Ort, an dem das Objekt platziert werden soll. Als nächstes werden die Werte für die Breite, Höhe und Länge sowie charakteristische Werte wie Ventilgröße, Stromversorgung etc. übergeben. Gleichzeitig können auch Angaben für die visuelle Farbgestaltung individuell gesetzt werden. Eine weitere Modifikation kann über die Angabe von Zahlenwerten für die Abstände in x-, y- und z-Richtung erfolgen. Dadurch werden Objekte ausgehend von einem Startwert innerhalb eines Bauraums versetzt oder symmetrisch angeordnet. Zusätzlich kann durch die Angabe eines Winkels ebenfalls eine Rotation um die Raumachsen erfolgen und Objekte variiert werden.

```
x_startPSU = PSC_1.Bauraum(freier_platz+1)*A320_Kabine.i2mm;
eval(['BelueftungA_', num2str(j), '=createBelueftung_(PSC_1,50,50,6.35,30,x_startPSU,[0 0.8 1],2,3.15,0);']);
eval(['BelueftungB_', num2str(j), '=createBelueftung_(PSC_1,50,50,6.35,30,x_startPSU,[0 0.8 1],2,3.15+2.5,0);']);
eval(['BelueftungC_', num2str(j), '=createBelueftung_(PSC_1,50,50,6.35,30,x_startPSU,[0 0.8 1],2,3.15+5,0);']);
```

Abbildung 4.7: Ausschnitt der Programmierung zur Erzeugung von Belüftungsobjekten

Das Programm zur Erstellung eines Flugzeugmodells folgt einer festgelegten Reihenfolge. Abbildung 4.8 zeigt ein vereinfachtes Aktivitätsdiagramm für die Instanziierung der Objekte. Es stellt die Vernetzung von elementaren Aktionen und deren Verbindungen mit Kontroll- und Datenflüssen grafisch dar. Das gezeigte Aktivitätsdiagramm beschreibt den Ablauf für die Erstellung des Geometriemodells. Der Initialknoten beschreibt den Beginn des Ablaufs und die Aktivität endet im Aktivitätsendknoten. Aktionen, hier Rechtecke, sind über Kontrollflüsse miteinander verbunden. Parallele Aktivitäten sind über einen schwarzen Balken gekennzeichnet und können Kontrollflüsse aufspalten oder zusammenführen. Durch eine Raute wird eine Aufspaltung des Kontrollflusses in alternative Zweige modelliert. Die Bedingungen stehen in eckigen Klammern an der jeweiligen Verzweigung.

Für eine bessere Darstellung wird das Aktivitätsdiagramm speziell für den Anwendungsfall zur Platzierung und Instanziierung der PSU-Funktionen erklärt. Nachdem der Ablauf gestartet wurde, wird zuerst das Flugzeugmodell erzeugt. Danach werden durch die parallele Aktivität die Kabine, der Rumpf und weitere Strukturkomponenten generiert. Im nächsten Schritt generiert der Rumpf die Querbalken und Spanten, indem er diesen Parameter übergibt. Nachdem die Aktion durchgeführt wurde, verläuft der Kontrollfluss wieder zusammen und teilt sich wiederum auf. Dabei wird unter anderem die Aktion zur Generierung der Gepäckablagen ausgeführt. Anschließend gelangt der Fluss an einen Kontrollknoten. An diesem überprüft das Programm, wie viele Passagier Service Kanäle generiert werden sollen. Die Informationen hierfür



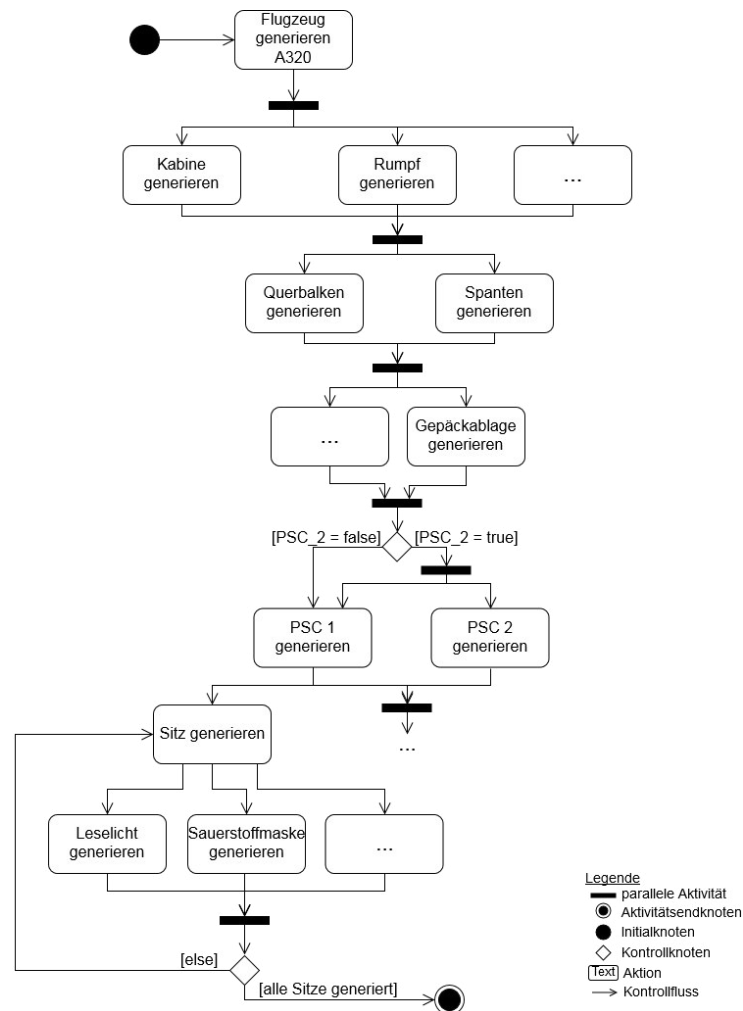


Abbildung 4.8: Vereinfachtes Aktivitätsdiagramm der Erzeugung des Kabinengeometriemodells

erhält der Code aus den Objekteigenschaften der Gepäckablagen und über das Anforderungsmodell. Hier kommt die KBE zum Einsatz, indem durch die Anforderungen und Wünsche an das auszulegende Kabinenkonzept auf eine spezielle Wissensdatenbank zurückgegriffen wird. Sind zwei Kanäle gewünscht, werden parallel sowohl der erste als auch der zweite PSC erzeugt, ansonsten wird nur ersterer generiert. Im letzten Schritt werden in einer Schleife die Sitze und deren zugehörige Passagier Service Funktionen erzeugt. Das folgende Ablaufschema wird ebenfalls bei zwei Kanälen angewendet. Dabei werden zuerst die Sitze einer Sitzreihe generiert. Danach werden abhängig von der regelbasierten Anordnung die Funktionen wie z.B. das Leselicht und die Sauerstoffmasken erstellt. Abschließend wird an einem Kontrollknoten überprüft, ob bereits alle Sitze im Flugzeug erstellt wurden. Ist dies nicht der Fall, wird die nächste Sitzreihe samt Passagier Service Einheit generiert und die Schleife erneut durchlaufen. Ansonsten endet die Aktivität im Endknoten.

In Abbildung 4.9 ist das zum Aktivitätsdiagramm zugehörige Geometriemodell des Flugzeugs dargestellt. Die Flügel und Triebwerke sind nicht detailliert ausgearbeitet,

da diese für die Betrachtung der Passagier Service Einheiten keine maßgebende Rolle spielen, aber für die objektorientierte Modellierung eines Flugzeugs notwendig sind und deshalb beispielhaft aufgezeigt werden. Weitere Ansichten des Modells sind unter A.2 dargestellt.

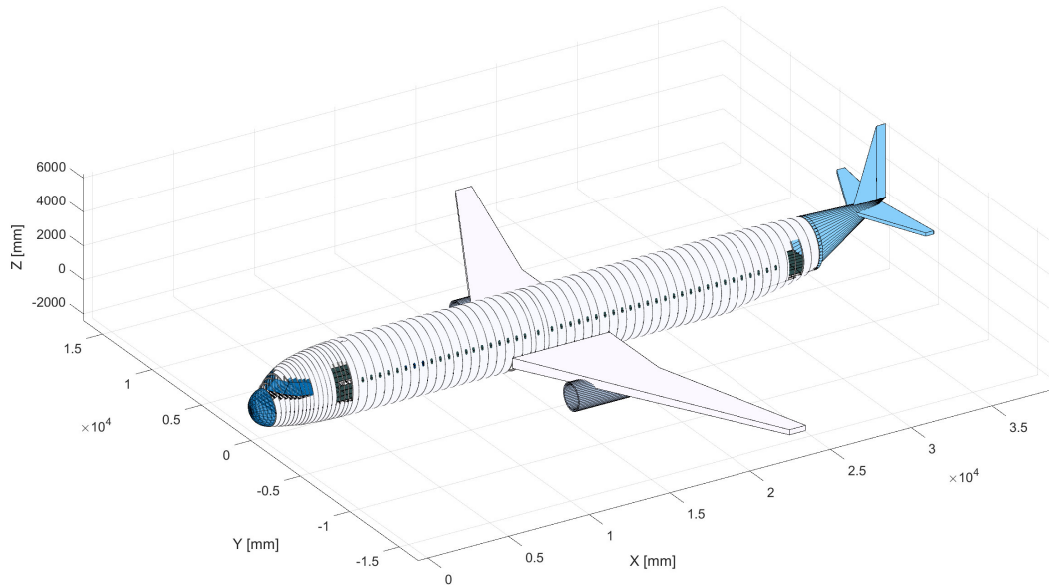


Abbildung 4.9: Geometriemodell des Flugzeugs für eine AIRBUS A320

Für die Bewertung im Rahmen dieser Arbeit wird das Modell einer AIRBUS A320 verwendet. Es ist jedoch möglich, auf Basis dieser Arbeit in weiteren Projekten darauf aufzubauen und den Rumpf sowie die anderen Komponenten in ihren Abmaßen an weitere disruptive Konzepte anzupassen.

#### 4.4.2 Ontologiemodell

Ein weiteres Modell für die Beschreibung des Systems PSU und der Kabine ist die Ontologie. Mit dieser wird ein allgemeines Vokabular definiert und für das Teilen von Wissen und Informationen verwendet. Dadurch ist es für neue Anwender, der in dieser Arbeit verwendeten Methodik, schneller ersichtlich, welches Konzept für die Abbildung der PSU verwendet wurde und wie die Beziehungen und Hierarchien der einzelnen Komponenten untereinander sind. Dies betrifft z.B. die Zuordnung einzelner Komponenten zur Primär- oder Sekundärstruktur im Flugzeug.

Abbildung 4.10 zeigt die Ontologie des heutigen Kabinenkonzepts einer AIRBUS A320, in der die Abhängigkeiten der einzelnen Objekte für die erste Sitzreihe der rechten Kabinenseite dargestellt sind. Der Aufbau gilt analog für jede weitere Sitzreihe, lediglich die Abhängigkeiten zu den Gepäckablagen ändert sich.

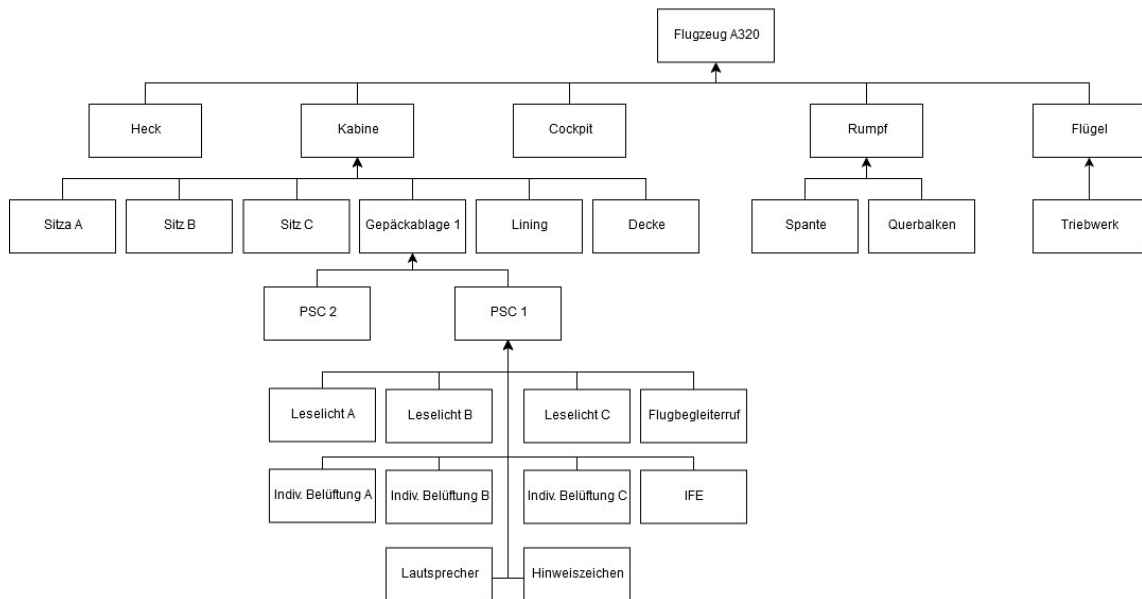


Abbildung 4.10: Ontologie der Kabine anhand der ersten Sitzreihe für die rechte Kabinenseite

Die Abhängigkeiten in der Kabine sind von oben nach unten aufgeführt. Das Flugzeug erzeugt entsprechend eine Kabine, ein Cockpit, einen Rumpf und Flügel. Letzteres wiederum generiert die Triebwerke, während vom Rumpf die Spanten und Querbalken als Objekte abgeleitet werden. Die Kabine gibt die Anzahl und Anforderungen für die Platzierung der Sitze vor. Sitz A, Sitz B und Sitz C werden daraufhin als eigene Objekte generiert. Zudem werden weitere Elemente wie die Decke, das Lining oder die Gepäckablagen erzeugt. Die Gepäckablagen enthalten je nach Ausführung einen oder zwei Passagier Service Kanäle. Entsprechend des vorhandenen Bauraums und den Regeln für die Anordnung der einzelnen PSU-Funktionen ergeben sich die Abhängigkeiten zum Passagier Service Kanal.

Die Kabine enthält neben den gezeigten Objekten noch viele weitere Komponenten, allerdings wird im Rahmen dieser Arbeit auf eine Darstellung verzichtet und nur auf die Systeme, die zur Betrachtung der Passagier Service Einheit benötigt werden, eingegangen.

#### 4.4.3 Funktionalitätenmodell

Wie bereits in Abschnitt 3.3 aufgeführt, bestehen diverse Anwendungsfälle für die Nutzung der Passagier Service Funktionen sowie Schnittstellen zu weiteren Systemen innerhalb der Kabine. Auf Basis der Daten in den erzeugten Objekten und deren Positionen werden die Wechselwirkungen und Verbindungen in der Kabine in einem Funktionalitätenmodell visualisiert. Abbildung 4.11 zeigt beispielhaft die

elektrische (rot), pneumatische (blau) und digitale (gelb) Versorgung bzw. Anbindung der Funktionen der PSU im dreidimensionalen Raum für eine exemplarische Anordnung. Dabei ist hier der Übersichtlichkeit halber nur die erste Sitzreihe der rechten Kabinenseite in Flugrichtung abgebildet.

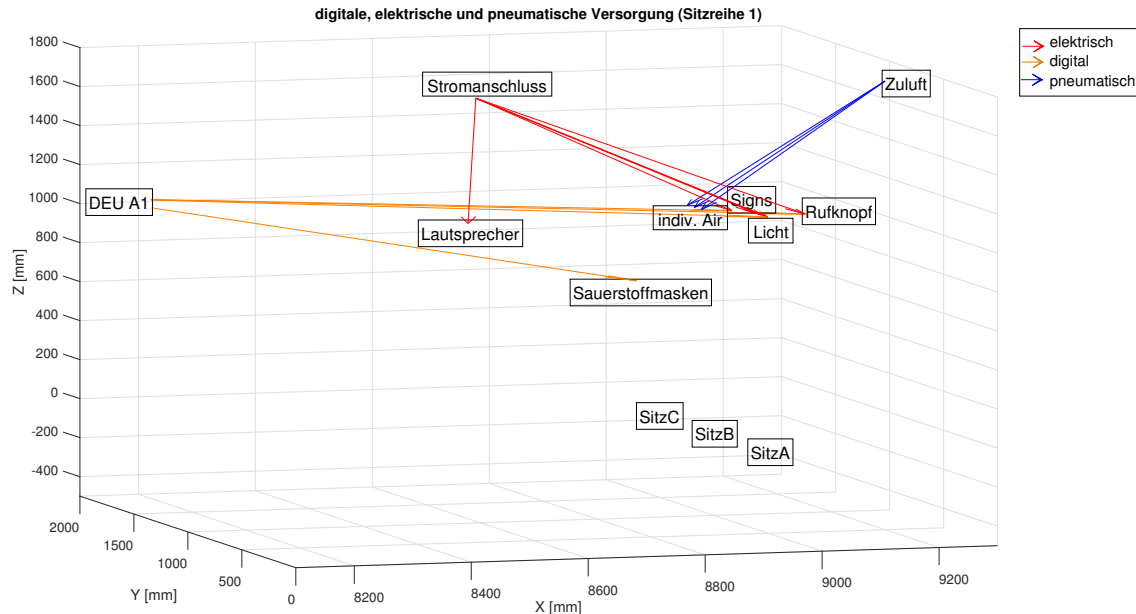


Abbildung 4.11: Funktionalitätenmodell einer beispielhaften Anordnung für die Versorgung

Weitere Darstellungen zeigen die haptische sowie die visuelle und akustische Interaktion mit dem Passagier und können mit dem Funktionalitätenmodell visualisiert werden. Diese Abbildungen sind im Anhang aufgeführt (siehe Anhang A.5). Damit könnten zukünftig potenzielle Optimierungspunkte, wie z.B. für das Zusammenführen von elektrischen Leitungen, gefunden und als eine Schnittstelle für das Kabelrouting bereitgestellt werden. Mit der Platzierung der jeweiligen Versorgungsquelle (z.B. elektrische Energie) und der Verbindung zur PSU könnten dann über neu implementierte Logiken das Kabelgewicht sowie die Kosten automatisch berechnet und bewertet werden.

#### 4.4.4 Anforderungsmodell

Die Platzierung der Passagier Service Funktionen basiert auf einer generierten Wissensdatenbank. In dieser sind das Fachwissen, die Regeln und die zugehörigen Prozessabläufe festgehalten, damit verschiedene Szenarien für die Auslegung der PSU untersucht und bewertet werden können. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 4.12 dargestellt.

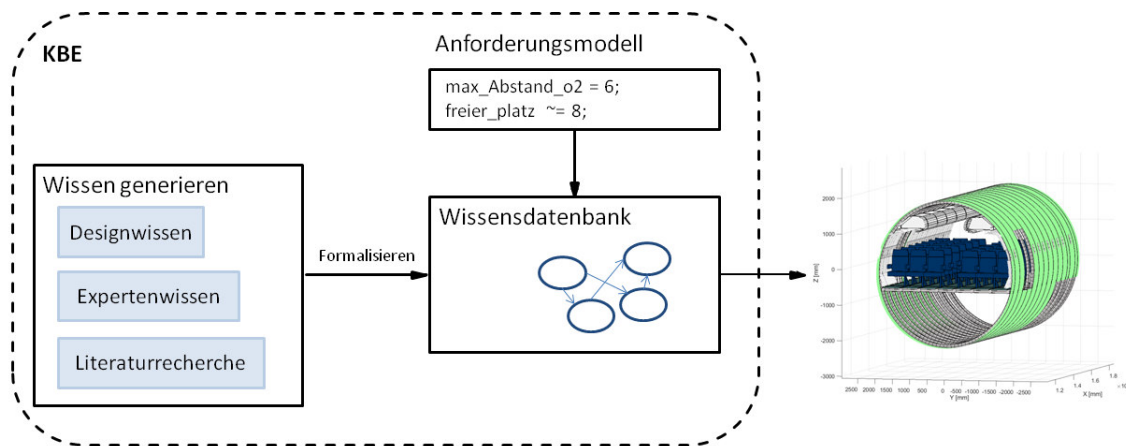


Abbildung 4.12: Knowledge-based Engineering und der Einfluss des Anforderungsmodells auf die Platzierung der PSU

Das Anforderungsmodell beschreibt die Ziele und Vorgaben an die Platzierung der PSU. Diese bestimmen, auf welchen Teil der Regeln innerhalb der Wissensdatenbank zurückgegriffen wird und nach denen die Passagier Service Funktionen platziert werden. Dafür werden *wenn-dann*-Regeln verwendet, die je nach Anforderung ein anderes Szenario innerhalb der Kabine generieren. Dies könnte zum einen die Einhaltung bestimmter Abstände zwischen einzelner Funktionen zum Passagier sein. Dabei wird z.B. der maximale Abstand zwischen den Sauerstoffmasken und dem Passagier auf 6 inch festgelegt. Zum anderen kann die Vorgabe für eine vormontierbare PSU mit einem *ist-nicht-gleich*-Operator ( $\sim=$ ) überprüft werden, indem belegte Felder mit definierten Zahlenwerten übersprungen werden. Aber auch wechselnde Randbedingungen, wie z.B. bei der Betrachtung einer neuen Gepäckablage, beeinflussen die Auslegung. Je nachdem welche geometrischen Maße, Eigenschaften oder Ziele vorgegeben werden, ändert sich das resultierende Kabinenszenario. Der genaue Prozessablauf bzw. das der Programmierung zugrunde liegende Regelwissen wird im folgenden Abschnitt genauer erläutert.

## 4.5 Regelbasierte Anordnung der PSU-Funktionen

Nachdem die Anforderungen für ein Kabinenszenario festgelegt wurden, wird auf die Wissensdatenbank zurückgegriffen, die mit Hilfe der vorgestellten Modelle das gewünschte Szenario erstellt und die Platzierung der Passagier Service Funktionen anhand der festgelegten Regeln durchführt. Diese speziellen Regeln werden im Folgenden vorgestellt. Abbildung 4.13 zeigt hierfür ein vereinfachtes Beispiel für die Anordnung der PSU-Funktionen im Passagier Service Kanal. Dieser wird als Matrix nachgebildet und stellt damit den möglichen Bauraum für die Platzierung der Elemente bereit. Die Breite eines einzelnen Feldes entspricht einem halben Zoll und



gleiterrufknopfs ausgeführt. Das Programm überprüft dabei, ob die Grenzen eines Bauraums für eine Sitzreihe nicht überschritten wird und jeder Sitz zugehörige Passagier Service Funktionen zugewiesen bekommt.

Die Hinweiszeichen und die Lautsprecher werden entsprechend dem gewählten Konzept angeordnet. Dies kann z.B. die Platzierung in jeder zweiten Reihe bedeuten. Dabei ist vor allem darauf zu achten, dass ein Hinweiszeichen jeweils von zwei Sitzreihen ausreichend wahrgenommen werden kann ohne direkt über dem Augenreferenzpunkt platziert zu sein. Als eine weitere Regel wird bei der Platzierung darauf geachtet, ob andere Elemente der PSU die Sichtbarkeit oder Nutzung von Funktionen beeinträchtigen. Bei der Platzierung der Bildschirme für das IFE muss zum einen darauf geachtet werden, dass für jeden Passagier dennoch in einem angemessenem Abstand die Anzeigen der Hinweiszeichen gelesen werden können und nicht verdeckt werden. Sollte dies nicht gewährleistet sein, sucht die Methode einen Alternativplatz oder erstellt ein zusätzliches Bauteil.

Bei der Bewertung der PSU-Szenarien wird ebenfalls die Montage betrachtet. Ein mögliches Vormontieren der Passagier Service Einheiten kann Kosten reduzieren und Arbeitszeit einsparen. Dies wird dann möglich, wenn die Einheiten innerhalb der Grenzen der Gepäckablagen platziert sind. Dafür wird in der Matrix an den Stellen an denen sich die Zwischenräume zwei benachbarter Gepäckablagen befinden feste Zahlenwerte eingetragen, hier symbolisiert durch die Zahl 8 in Abbildung 4.13. Die Felder sind somit belegt und können nicht mehr von einem der PSU-Elemente überschrieben werden. Das Programm achtet bei der Suche nach einem Platz für ein Element auf diese gesperrten Bereiche. Sobald ein Platz gefunden wurde, der den Regeln für die Abstände folgt, werden die benachbarten Felder entsprechend den Abmaßen des Elements überprüft. Sind diese leer, wird das Element platziert. Ist allerdings eines der Felder belegt, wird das erste freie Feld nach der Belegung gesucht und von dort wieder startend auf freie Felder überprüft. Wenn in diesem Bereich alle Felder frei sind, wird das Element dort versetzt angeordnet. Ein Abstandsoperator überprüft dabei permanent, ob die Platzierung über den Sitz nach hinten hinausgeht, um den Bezug zum Sitz nicht zu verlieren und ein nach hinten greifen zu verhindern. Tritt dieser Fall dennoch auf, wird für das Element nach einem freien Platz vor den Sauerstoffmasken gesucht und ein größerer Abstand für die Erreichbarkeit in Kauf genommen.

Neben der reinen Platzierung der Sauerstoffbox, besteht die Möglichkeit, die Masken auch innerhalb dieser zu variieren. Sollte aufgrund des vorhandenen Bauraums die Box zwar über dem SRP angeordnet sein, die Maske würde aber ein nach hinten greifen des Passagiers hervorrufen, wechseln die Masken in den vorderen Bereich der

Sauerstoffbox. Dadurch kann zum Teil unabhängig von der Platzierung innerhalb des Passagier Service Kanals die Erreichbarkeit sichergestellt werden.

Damit ist die regelbasierte Programmierung abgeschlossen und die Bewertung der Konzepte kann im nächsten Abschnitt durchgeführt werden. Der zugrundeliegende Quellcode befindet sich auf der beigefügten CD sowie ein Teilabschnitt des Hauptprogramms zur Anordnung der Funktionen ist im Anhang A.1 aufgeführt.



## 5. Kabinenentwurfstudie

Im Rahmen der Arbeit werden vier verschiedene Kabinenszenarien mit den erstellten Modellen erzeugt und anschließend entsprechend der Kriterien aus den Abschnitten 4.2 und 4.3 bewertet. Des Weiteren werden die Ergebnisse der Zielfunktionen vom Modell Mensch und Montagekostenmodell vorgestellt.

### 5.1 Kabinenszenarien

Mit Hilfe der erstellten Modelle werden vier unterschiedliche Kabinenszenarien generiert und anschließend bewertet. Die Abbildung 5.1 zeigt diese sowie die jeweils gestellten Anforderungen für der Auslegung der PSU. Als erstes wird ein Referenzszenario auf Basis der heutigen Kabinenkonfiguration eines AIRBUS A320 ausgelegt, bei der die Passagier Service Einheiten nicht vormontierbar sind und sich innerhalb eines Versorgungskanals unterhalb der Gepäckablagen (engl.: *Enhanced Bin*, EC-Bin) befinden. Zudem bestehen die Anforderungen, dass bei dem Referenzszenario die Lautsprecher und Hinweiszeichen in jeder zweiten Reihe eingebaut werden und die Anordnung der anderen Funktionen immer identisch zueinander sind sowie sich im gleichen Abstand zum Passagier befinden. Aufbauend auf dieser Referenz wird das Szenario 1 erzeugt, bei dem eine neue Gepäckablage (*Large Bin*, LBin) in die Kabine eingebaut wird und dadurch mehr Stauraum für das Handgepäck der Passagiere an Board schafft. Die Gepäckablage wird dafür als ein neues Objekt generiert, wodurch mit Hilfe des MBSE-Ansatzes schnell und agil disruptive Designs generiert werden können und sich vergleichen lassen. Die Anforderungen an die Platzierung der Passagier Service Funktionen bleiben identisch zu denen der Referenz, lediglich die Randbedingungen des Passagier Service Kanals ändern sich aufgrund der Abmaße des LBins.

In einem zweiten Szenario wird ebenfalls der LBin verwendet. Allerdings wird in diesem Fall untersucht, wie sich eine kompaktere Bauweise der PSU auf den Passagierkomfort ausübt, indem die Reihenfolge der einzelnen Funktionen geändert und die Maße der verwendeten Bauteile gekürzt werden. Eine weitere Neuerung der Anforderungen für die Platzierung der Passagier Service Einheit ist die Möglichkeit

zur Vormontage. Dabei darf die PSU die Abmaße der Gepäckablagen in Längsrichtung nicht überschreiten. Durch eine vormontierbare PSU können Montagekosten reduziert und Arbeitszeit eingespart werden.

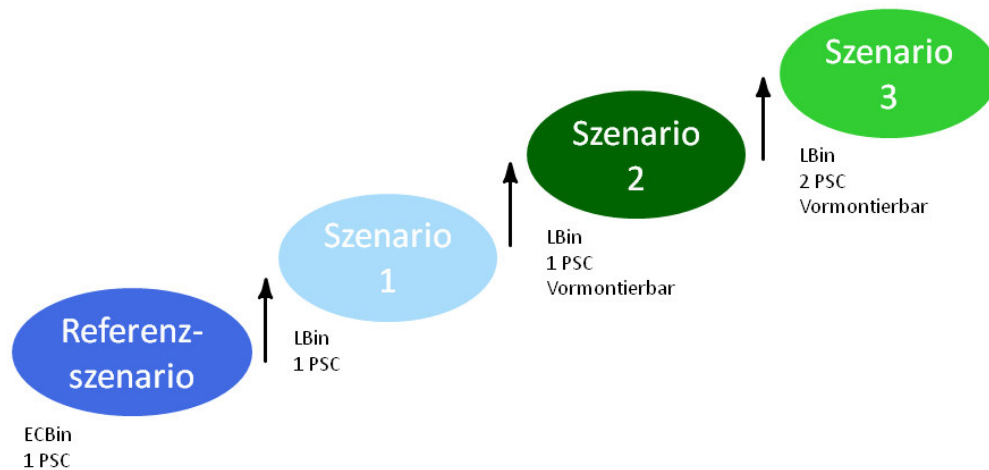


Abbildung 5.1: Darstellung des Referenzszenarios und den drei Szenarien mit ihren Anforderungen an die Platzierung der PSU

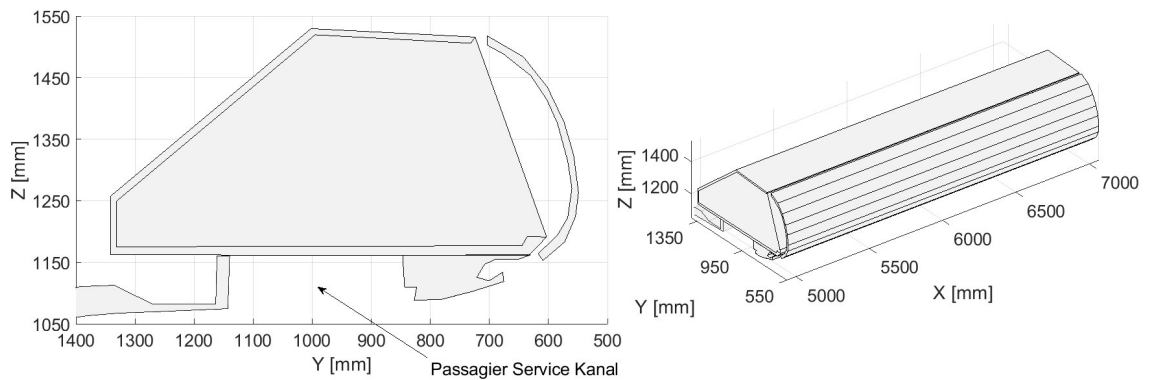
Bei der Verwendung des LBins verschiebt sich der PSC in Richtung Fensterplatz und erhöht dadurch die Entfernung zu den Funktionen für den Gangplatz. Durch die Einführung einer neuen Technologie soll der Passagierkomfort, trotz einer auf die Vormontage ausgelegten PSU, gewährleistet sein. Aufbauend auf dem Szenario 2 wird daher neben der Anforderung zur Einhaltung der Grenzen der Gepäckablagen ein zweiter Passagier Service Kanal im Szenario 3 verwendet. Die Platzierung der Funktionen teilt sich auf zwei Versorgungskanäle auf, wodurch eine kompaktere Bauweise bei erhöhtem Passagierkomfort geschaffen wird. In den folgenden Abschnitten werden die genannten Szenarien detaillierter vorgestellt.

### 5.1.1 Annahmen für die Auslegung der Kabine

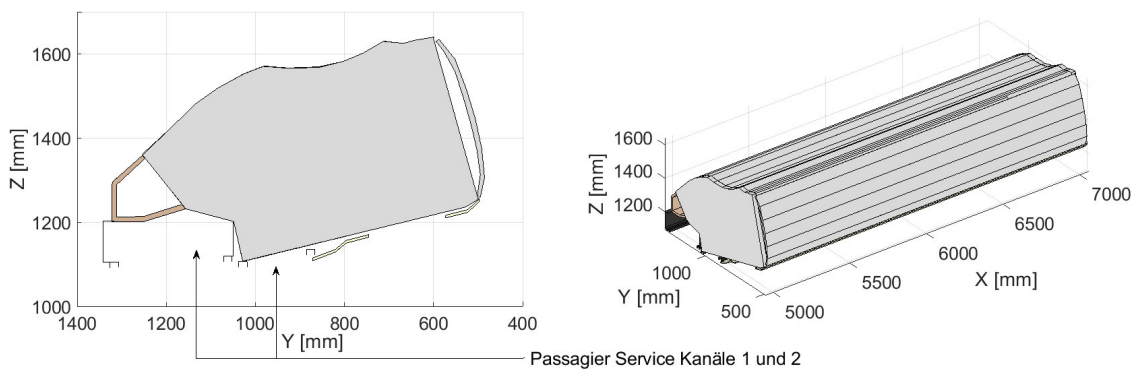
Alle untersuchten Szenarien werden für die gleiche Kabinenauslegung betrachtet. Es wird als Flugzeugtyp eine AIRBUS A320 mit einem Sitzabstand von 29 inch gewählt. Des Weiteren handelt es sich um eine Single Aisle Konfiguration. Dies stellt eines der am häufigsten verwendeten Auslegungen für Kurzstreckenflugzeuge dar und eignet sich daher sehr gut für die Betrachtung eines modellbasierten Ansatzes zur Auslegung von Flugzeugkabinen. Das Flugzeug hat eine Länge von 37,5 m, eine Spannweite von 35,8 m und einen Rumpfdurchmesser von 3,9 m. Die Kabinenbreite reduziert sich durch die Primärstruktur auf 3,6 m. Die verwendeten Daten für die Erstellung der Primär- und Sekundärstrukturen stammen von AIRBUS [45, 46]. Für die Abmaße der Sitze wird ein Standardsitz für Kurz- und Mittelstrecken von

RECARO verwendet [47, 48]. Unter Berücksichtigung der Notausgänge ergeben sich somit 180 Sitzplätze in der Kabine.

Neben der Varianz in den Abmaßen der Passagier Funktionen werden ebenfalls zwei verschiedene Gepäckablagen untersucht. Heutiger Stand der Technik ist der ECBin von AIRBUS. Dieser zeichnet sich durch einen mittleren Passagier Service Kanal und einer mittigen Platzierung oberhalb der Sitzreihe aus (Abbildung 5.2a). Die Breite des PSC beträgt 10 inch. Dem gegenüber steht der LBin von AIRBUS. Bei diesem Modell besteht die Möglichkeit zwei Passagier Service Kanäle zu verwenden. Abbildung 5.2b zeigt den Aufbau des LBins mit dem Bauraum für zwei PSCs. Der größere Kanal hat eine Breite von 10 inch, während der kleinere eine Breite von 5 inch aufweist. Des Weiteren bietet diese Anordnung, bedingt durch die größeren Maße der Gepäckablage, mehr Stauraum für den Passagier. In der weiteren Dokumentation werden für die Bezeichnung der Gepäckablagen die Kurzvarianten ECBin und LBin verwendet.



(a) Darstellung des ECBin für die Referenzkabine



(b) Darstellung des LBin für die neuen Kabinenkonzepte

Abbildung 5.2: Gegenüberstellung der zwei verwendeten Gepäckablagen

Sofern nicht anders angegeben werden für die Austrittsgeschwindigkeit der Luftdüsen ein Wert von 1,0 m/s und für die Leistung der Lautsprecher 10 Watt angenommen. Der Kennschalldruck eines Lautsprechers beträgt bei einem typischen Bauteil aus der

Luftfahrt 87 dB [49]. Zudem ist dieser jeweils um die y-Achse um  $15^\circ$  gekippt, damit eine bessere Beschallung für die Passagiere ermöglicht wird [45]. Die Zeichenhöhe der Hinweiszeichen beträgt bei den untersuchten Szenarien 18 mm [45]. Damit sind die Grundparameter für die Gestaltung einer Kabine festgelegt. Darauf aufbauend können im folgenden Abschnitt die neuen Szenarien modelliert werden. Aufgrund der Übersichtlichkeit wird in den folgenden Grafiken nur die rechte Kabinenseite in Flugrichtung dargestellt. Der Aufbau der Kabine sowie die Anordnung der Passagier Service Funktionen ist symmetrisch und daher äquivalent zur linken Seite.

### 5.1.2 Referenzszenario

Für einen Vergleich mit neuen Konzepten wird basierend auf den Daten von AIRBUS ein Referenzszenario erstellt und ebenfalls bewertet [45]. Das vorliegende Konzept wird in diversen Flugzeugen von AIRBUS eingebaut und stellt den derzeitigen Stand der Technik dar. Die Abmaße für die einzelnen Elemente sind in Tabelle 5.1 aufgelistet. Für die Referenz wird eine Sauerstoffbox mit einer Länge von 11 inch und eine Belüftungsbox mit den Maßen 4 inch verwendet. Die Leselichter bilden zusammen mit dem Flugbegleiterrufknopf eine Kombi-Einheit mit einer Gesamtlänge von 7 inch. Die Passagier Service Einheit wird zudem in jeder zweiten Sitzreihe um einen Lautsprecher (3 inch) in Kombination mit den Hinweiszeichen (2 inch) erweitert. Die Breite der jeweiligen Boxen entspricht dem vorhandenen Bauraum des PSC und beträgt daher 10 inch. Weitere verwendete Werte sind im Anhang A.3 zu finden.

PSU-Funktion	Bezeichnung	Wert
Sauerstoffbox	Länge	11 inch
indiv. Belüftung	Länge	4 inch
	Abmaße Düse	$\varnothing$ 30 mm
Leselicht	Länge	5 inch
	Abmaße Leselicht	$\varnothing$ 60 mm
Hinweiszeichen	Länge	2 inch
Lautsprecher	Länge	3 inch

Tabelle 5.1: Annahmen für das Referenzszenario eines AIRBUS A320 [45]

Abbildung 5.3a zeigte eine frontale Ansicht auf die Kabine und die rechte Sitzreihe in Flugrichtung. Die PSU-Funktionen sind innerhalb des Kanals unterhalb der Gepäckablagen angeordnet. Eine detailliertere Ansicht ist in 5.3b aufgezeigt. Die Anordnung der einzelnen Funktionen basiert auf der generierten Wissensdatenbank mit der Anforderung an einen sich wiederholenden Aufbau. Zuerst wird die Sauerstoffbox (rote Box) mittig oberhalb des Augenreferenzpunkts des Passagiers platziert.

Dahinter anschließend findet sich die individuelle Belüftung (blaue Boxen) der Sitzreihe. Das Kombipanel bestehend aus den Leselichtern mit seinen Schaltern (gelbe Boxen) und dem Flugbegleiterruf (orangene Box) wird ebenfalls dahinter angeordnet. Bei diesem Konzept befindet sich nur ein Flugbegleiterrufbutton für alle drei Sitze mittig zwischen dem Gang- und Mittelplatz. Die Lautsprecher (grüne Box) und die Hinweiszeichen (pinke Box) werden nach den Leselichtern platziert. Bei der Platzierung der einzelnen Bauteile wird auf eine symmetrische Anordnung geachtet. Außerdem sind die jeweiligen äußeren Luftventile und Leselichter leicht um die x-Achse rotiert angeordnet, wodurch diese in ihrer Grundstellung bereits gut auf den Sitz ausgerichtet sind.

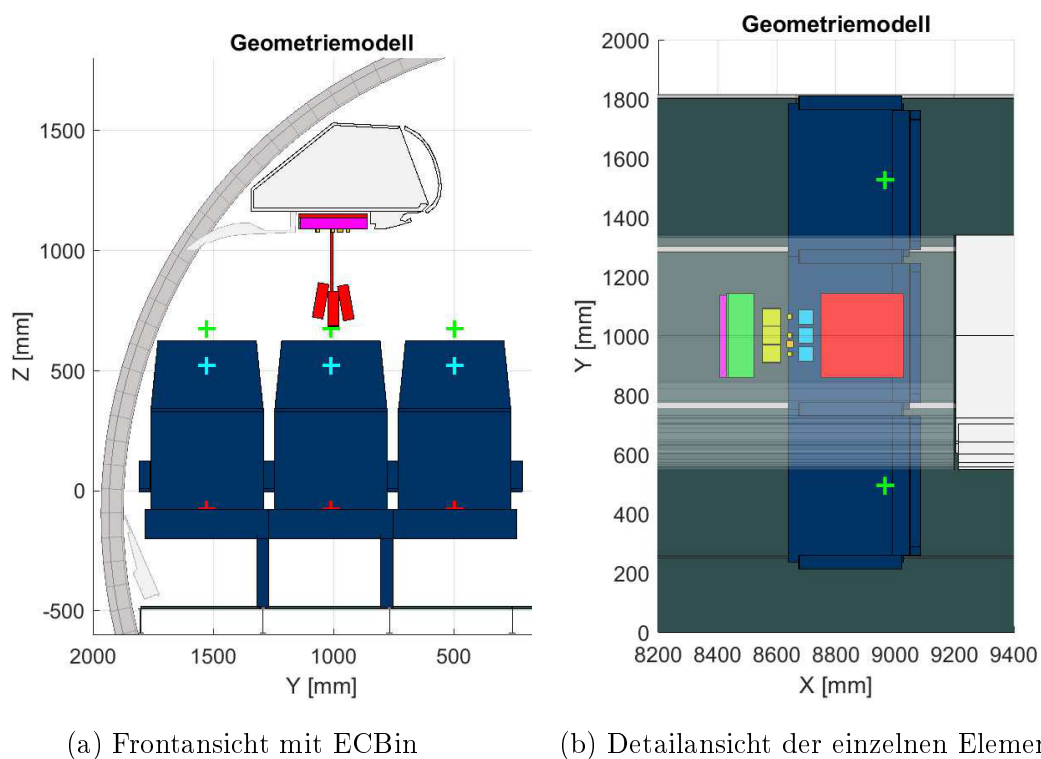


Abbildung 5.3: Anordnung der Passagier Service Funktionen für das Referenzszenario von AIRBUS

Bei der Anordnung der einzelnen Baugruppen werden die Lücken zwischen den einzelnen Gepäckablagen nicht berücksichtigt. Dadurch befinden sich einige der PSU-Funktionen auch zwischen zwei OHSCs und ermöglichen eine immer gleiche Reihenfolge bei der Anordnung der einzelnen Funktionen. Die mit der Programmierung erzeugte Platzierung spiegelt damit auf Basis des generierten Wissens den heutigen Stand der Technik wider (siehe Abbildung 3.3b). Mit diesem Modell sollen hauptsächlich die Aspekte des Passagierkomforts untersucht werden. Der Fokus liegt vor allem auf der Erreichbarkeit der Funktionen für den Passagier.

### 5.1.3 Szenario 1: Neue Gepäckablage

Das Szenario 1 untersucht die gleichen Annahmen für die Abmaße der einzelnen PSU-Funktionen wie beim Referenzszenario (Werte aus Tabelle 5.1). Lediglich die neue Gepäckablage (LBin) wird verwendet. Dadurch ändern sich die Anforderungen an die Platzierung der Bauteile durch die Maße und Randbedingungen des neuen Versorgungskanals. Abbildung 5.4a zeigt das Geometriemodell in der Frontalansicht für die rechte Kabinenseite. Die PSU-Funktionen sind innerhalb des ersten Passagier Service Kanals angeordnet. Im Gegensatz zum Referenzszenario befindet sich der Kanal nicht mehr mittig über dem Mittelplatz, sondern weiter außen Richtung Seitenwand der Kabine. Die Anordnung der Funktionen ist ebenfalls wie beim Referenzszenario aufgebaut (Abbildung 5.4b).

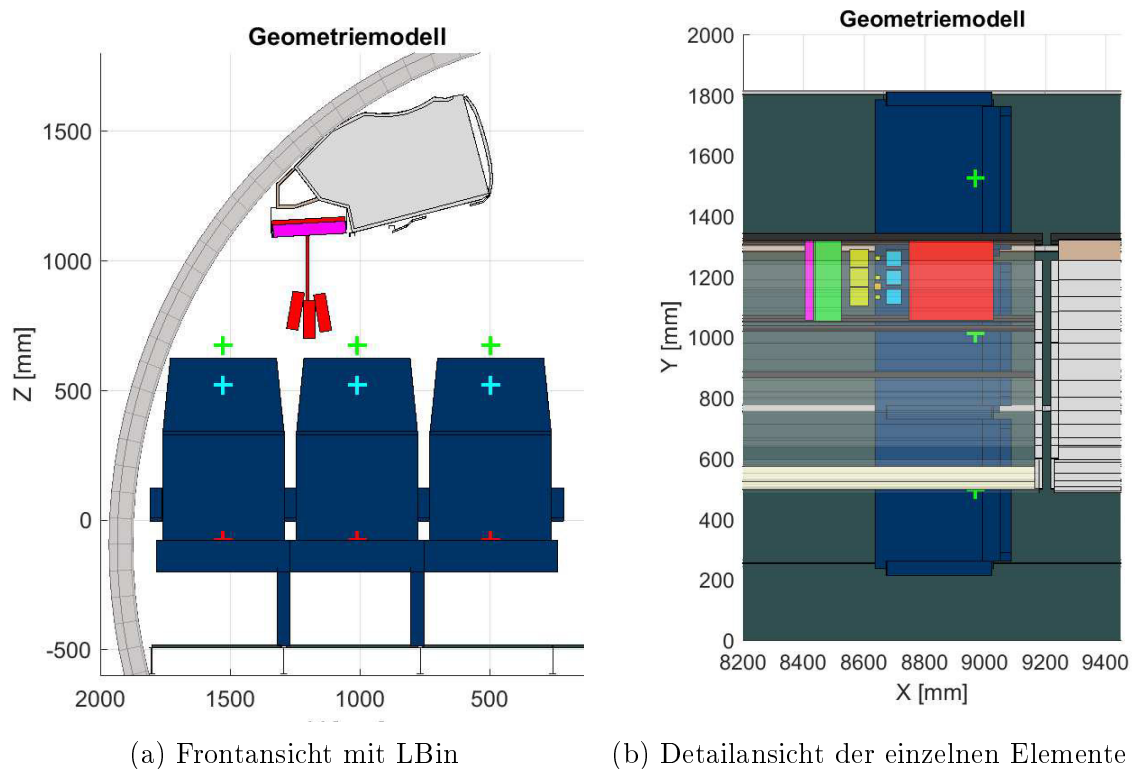


Abbildung 5.4: Anordnung der Passagier Service Funktionen für das Szenario 1

In gleicher Weise wie beim Referenzszenario wird bei der Anordnung der einzelnen Passagier Service Funktionen keine Rücksicht auf das Überschreiten des Bauraums in x-Richtung bei den Gepäckablagen genommen. Die PSU kann daher ebenfalls über die Lücken der OHSCs hinaus angeordnet werden und ermöglicht damit einen immer gleichen Aufbau der PSU.

### 5.1.4 Szenario 2: LBin, vormontierbar - gekürzt

Als zweites Szenario wird eine verkürzte Variante für die einzelnen PSU-Funktionen untersucht. Die verwendeten Abmaße sind in Tabelle 5.2 aufgelistet. Die Sauerstoffbox wird auf 8 inch gekürzt, ebenso die Gesamtlänge des Kombipanel mit den Leselichter. Wie bereits im Abschnitt 3.1.2 vorgestellt, ermöglichen der Einsatz von LEDs eine Reduzierung der Gehäuse für die Leselichter durch die kompakte Bauweise einer Leuchtdiode. Daher werden bei diesem Szenario die Leselichter auf die Maße 50x50 mm reduziert. Des Weiteren gibt es neue Ansätze für die Anordnung der Sauerstoffmasken und des Generators, sodass sich die Box ebenfalls kürzen lässt. Alle weiteren Funktionen behalten die wie bei den vorherigen Szenarien verwendeten Abmaße. Im Gegensatz zu den beiden vorherigen Szenarien wird die Reihenfolge

PSU-Funktion	Bezeichnung	Wert
Sauerstoffbox	Länge	8 inch
indiv. Belüftung	Länge	4 inch
	Abmaße Düse	Ø 30 mm
Kombipanel: Leselicht, Hinweiszeichen, Flugbegleiterruf	Länge	5 inch
	Abmaße Leselicht	Ø 50 mm
Lautsprecher	Länge	3 inch

Tabelle 5.2: Randbedingungen für Szenario 2

der Elemente geändert. Relativ mittig über dem Sitzreferenzpunkt werden zuerst die Leselichter und der Flugbegleiterrufknopf positioniert. Anschließend folgen die Hinweiszeichen und die individuelle Belüftung. Danach werden erst die Sauerstoffmasken und in jeder zweiten Reihe die Lautsprecher platziert.

Aufgrund der Anforderung an eine Vormontage verhindern die hinterlegten Regeln der Wissensdatenbank bei diesem Szenario ein Überschreiten der Lücken zwischen den Gepäckablagen. Dadurch ändert sich bei einigen Sitzreihen die Reihenfolge der einzelnen Funktionen und passt sich dem jeweiligen definierten Bauraum neu an. Ziel ist es hierbei, eine mögliche Vormontage ebenfalls unter dem Aspekt der geometrischen Anforderungen hin zu untersuchen und den beiden bisherigen Szenarien gegenüber zustellen.

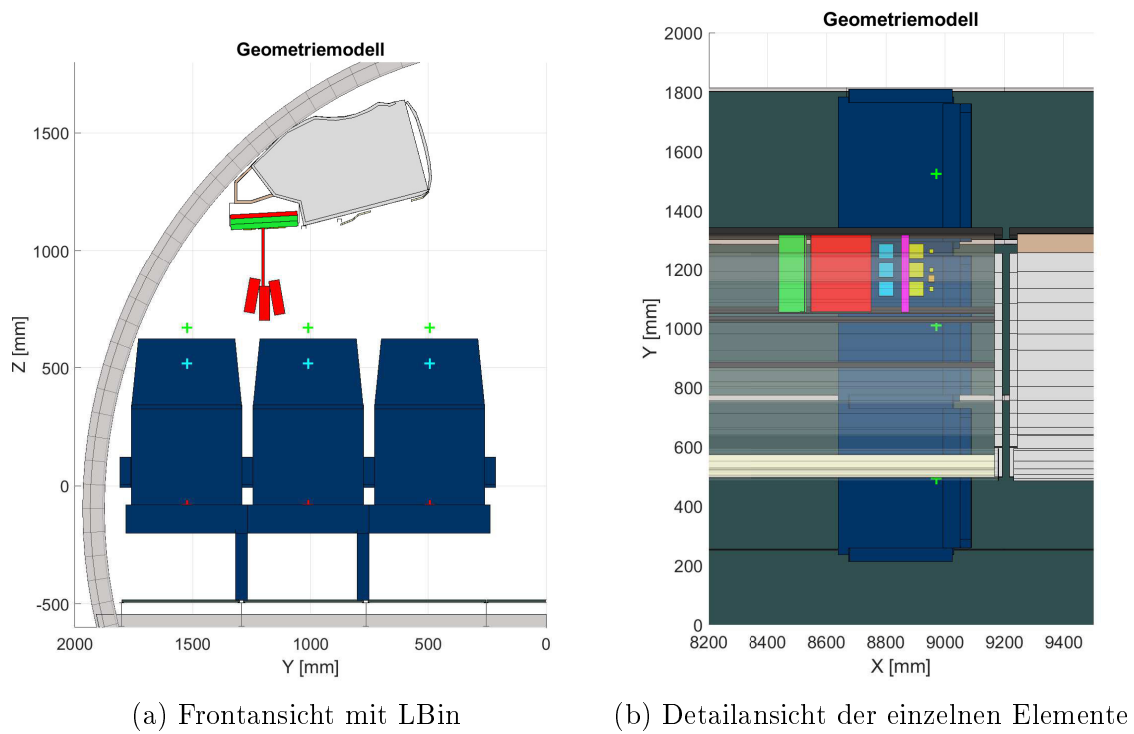


Abbildung 5.5: Anordnung der Passagier Service Funktionen für das Szenario 2

### 5.1.5 Szenario 3: LBin, vormontierbar, zwei PSCs

Das dritte Szenario untersucht die Platzierung der Passagierfunktionen verteilt auf zwei Passagier Service Kanäle unter der Anforderung an eine Vormontage. Dabei

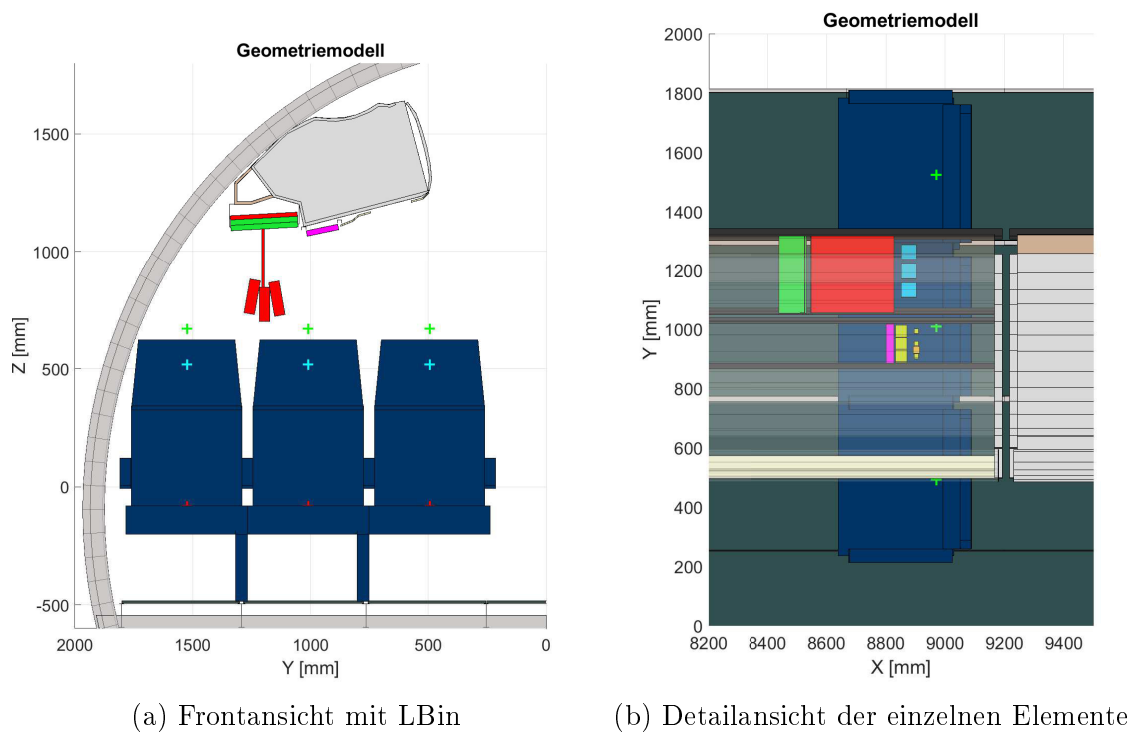


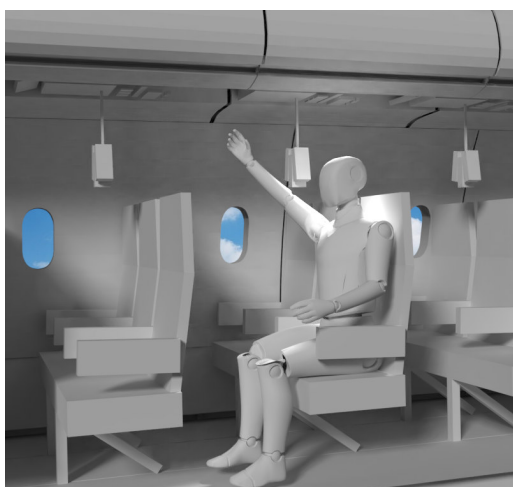
Abbildung 5.6: Anordnung der Passagier Service Funktionen für das Szenario 3



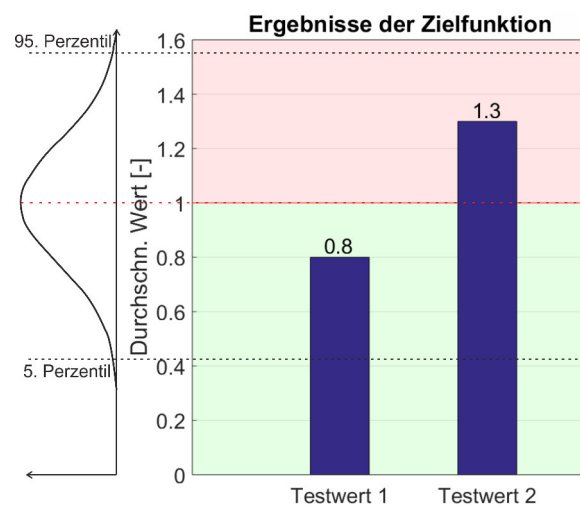
werden die gleichen Parameter aus Tabelle 5.1 für die Abmaße der einzelnen Bauteile verwendet. Die beiden folgenden Abbildungen stellen diesen Zusammenhang deutlicher dar. Abbildung 5.6a zeigt eine Frontalansicht auf die rechte Sitzreihe im Flugzeug und die zwei Versorgungskanäle. Dabei verteilen sich die einzelnen Bauteile wie folgt. Im größeren Kanal befinden sich die Sauerstoffmasken und die individuelle Belüftung für den Passagier. Der Lautsprecher wird wie bei den vorherigen Szenarien in jeder zweiten Sitzreihe ebenfalls in dem ersten Kanal angeordnet. Parallel dazu werden die Leselichter, der Flugbegleiterruf und die Hinweiszeichen im zweiten Kanal platziert. Bei der Anordnung wird neben der Einhaltung der Grenzen von den Gepäckablagen für eine bessere Vormontage der PSU auch auf einen bündigen Abschluss zwischen dem Belüftungspanel und dem Kombipanel geachtet. Dadurch soll die Anordnung auch optisch anschaulich bleiben (Abbildung 5.6b).

## 5.2 Auswertung der Zielfunktionen

Für die vier Szenarien aus Abschnitt 5.1.1 werden sowohl die Zielfunktionen für den Passagierkomfort berechnet als auch das Einsparpotenzial bei der Montage bewertet. Die Daten für die Berechnung stammen aus dem Geometriemodell der Kabine und der Modellierung des Norm-Menschen zur Simulation der PSU-Mensch Interaktion (5.7a). Dabei variieren die anthropometrischen Daten des Passagiers stark, weshalb für eine einfache Bewertung die Maße eines durchschnittlichen Norm-Menschen verwendet werden. Die allgemeine Normalverteilung der Körpermaße ist in Abbildung 5.7b neben einer beispielhaften Auswertung der Abstände dargestellt. Erreicht eine



(a) PSU-Mensch Interaktion<sup>5</sup>



(b) Beispielhafte Zielfunktionswerte

Abbildung 5.7: Bewertung des Passagierkomforts mit dem Modell des Menschen

<sup>5</sup>Die Abbildung wurde mit der 3D-Grafiksoftware BLENDER<sup>®</sup> erstellt.

Zielfunktion dabei den Wert 1, so erfüllt diese die Anforderung an den maximalen Abstand für den durchschnittlichen europäischen Menschen. Überschreitet der Wert allerdings die 1, kann dieser die PSU-Funktion entweder nicht mehr erreichen ohne dabei seine Sitzposition zu verlassen oder muss mit Einschränkungen hinsichtlich der akustischen oder visuellen Wahrnehmung rechnen. Für einen großgewachsenen Norweger wären allerdings die Funktionen erreichbar. Wird der Wert hingegen unterschritten, ist die Erreichbarkeit und der Komfort für den Passagier gewährleistet, sodass auch die japanische 5 %-Frau die Möglichkeit hat, die Funktionen zu bedienen.

Die Ergebnisse der einzelnen Szenarien sind in Abbildung 5.8 aufgeführt. In dunkelblau sind die Werte für den Passagierkomfort und in hellblau die Ergebnisse für eine Kosteneinsparung bei der Montage angegeben. Das Szenario 1, und damit das Referenzszenario, erzielt den zweithöchsten Wert bei der Abstandsberechnung. Das zweite Szenario mit der gleichen Anordnung und dem LBin weist einen um 5 % höheren Wert für den Passagierkomfort auf. Die niedrigsten und damit besseren Werte erzielen das Szenario 2 und das Szenario 3. Für die Betrachtung der Montagekosten werden diese auf das Referenzszenario hin normiert, sodass bei den zwei vormontierbaren Szenarien 2 und 3 nur 32 % der Kosten anfallen würden.

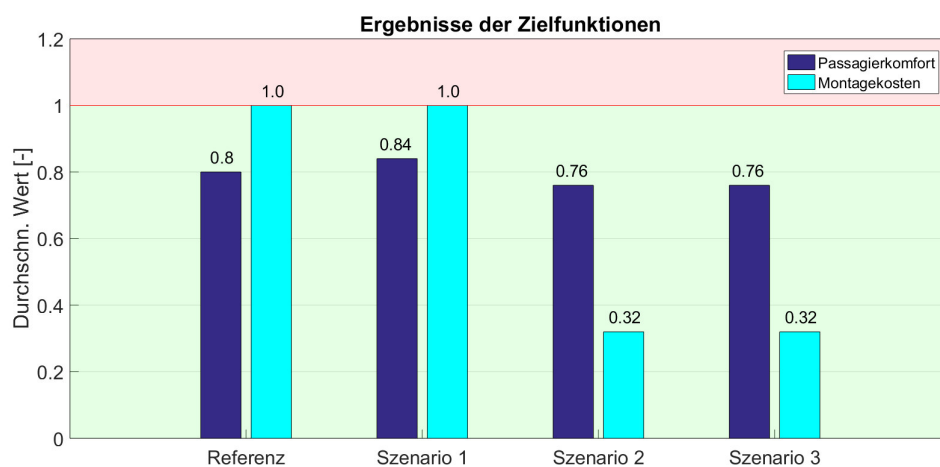


Abbildung 5.8: Ergebnisse der Zielfunktionen für die vier untersuchten Szenarien für den Passagierkomfort (dunkelblau) und die Montagekosten (hellblau)

Aufgrund der gemittelten Werte für die Berechnung der Zielfunktion, wird in den beiden folgenden Abschnitten nochmal genauer auf die Ergebnisse der Modelle eingegangen. Dabei werden vor allem die jeweiligen Sitze und ihre Positionen miteinander verglichen. Sitz A beschreibt jeweils den Gangplatz, Sitz B den Mittelplatz und Sitz C den Fensterplatz. In den nachstehenden Abbildungen ist das Referenzszenario blau, das Szenario 1 hellblau, das Szenario 2 grün und Szenario 3 hellgrün dargestellt und auf der x-Achse aufgetragen. Die berechneten Werte der jeweiligen Zielfunktion

sind in den Säulendiagrammen auf der y-Achse aufgeführt. Die Daten stammen aus der implementierten Programmierung und dem zugrundeliegendem Geometriemodell der Kabine. In Abbildung A.4 ist die zugehörige Bewertungsmatrix mit allen Werten für das Referenzszenario einmal beispielhaft aufgeführt.

### 5.2.1 Ergebnisse Passagierkomfort

Die folgenden Grafiken geben einen detaillierten Einblick in die Bewertung. Abbildung 5.9 zeigt den direkten Vergleich aller Werte für die Zielfunktionen der jeweiligen Passagier Service Funktionen. Anhand der Abbildung ist erkennbar, dass sich die einzelnen Werte geringfügig voneinander unterscheiden. Neben den Sauerstoffmasken erzielen die Lautsprecher und die Hinweiszeichen die besseren Ergebnisse bzgl. der Anforderungen an die Griff-, Hör- und Sehweite. All diese Werte liegen deutlich unter dem Wert 1. Insgesamt zeigt sich die Tendenz, dass die Ergebnisse für das Referenzszenario und Szenario 2 größer ausfallen als bei den beiden anderen Szenarios.

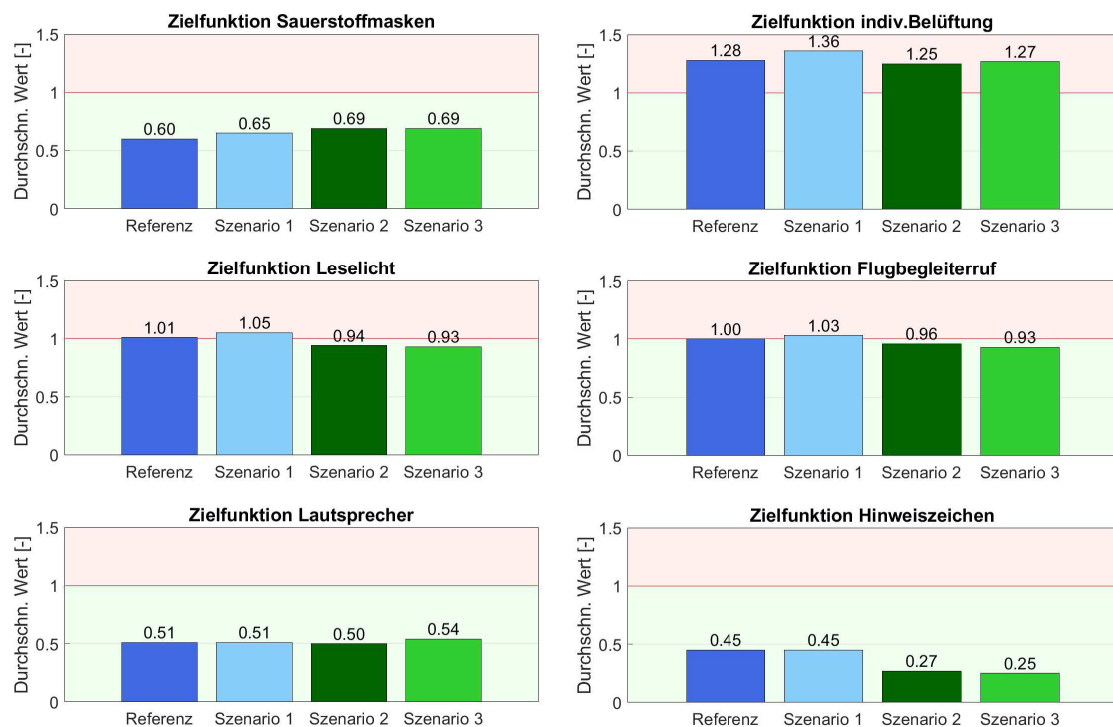


Abbildung 5.9: Vergleich der Mittelwerte für alle Szenarien inkl. des Referenzszenarios

Aufgrund der hohen Sicherheitsanforderungen an die Verkehrsflugzeuge fallen die Ergebnisse für die Lautsprecher und die Hinweiszeichen deutlich geringer aus als bei den anderen Funktionen. Zudem unterscheiden sich die Werte bei dem Lautsprecher

nur marginal. Wie bereits in Abschnitt 3.2 aufgeführt, ist in der CS-25 nur festgehalten, dass die Hinweiszeichen von jedem Passagier aus lesbar und die Durchsagen vom Lautsprecher verständlich sein müssen. Durch die Platzierung der Hinweiszeichen und der Lautsprecher in jeder zweiten Reihe sind die Anforderungen deutlich übererfüllt. Die Fluggesellschaft gewährleistet damit bei Ausfall eines der Funktionen, dass der Passagier in einer Notsituation weiterhin Zugang zu den wichtigen Informationen erhält. Für die weitere Betrachtung der einzelnen Ergebnisse wird daher auf die Darstellung dieser Werte verzichtet. Die vollständigen Ergebnisse sind in A.4 aufgeführt.

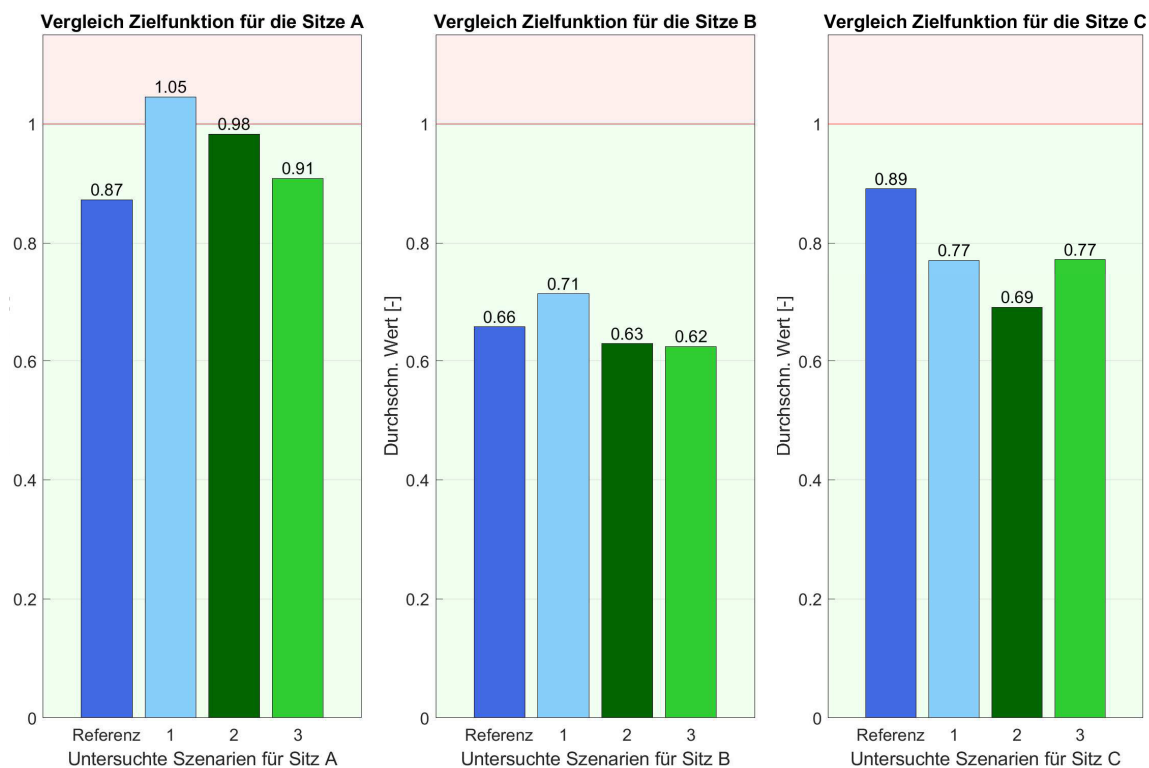


Abbildung 5.10: Vergleich der Mittelwerte für die Sitze A, B und C bei allen Szenarien sowie des Referenzszenario

Eine genauere Analyse der Ergebnisse ist anhand der Abbildung 5.10 möglich. Diese stellt die Werte für die einzelnen Szenarien unter dem Filter bereit, dass jeweils nur die Sitze A, B und C miteinander verglichen werden. Die Zielfunktion bezieht sich auf alle Funktionen der PSU, jedoch sind dieses Mal nur die Parameter des jeweiligen Sitz-Types eingeflossen. Die deutlichsten Unterschiede sind beim Gangplatz (Sitz A) und beim Fensterplatz (Sitz C) zu sehen. Im direkten Vergleich zum Referenzszenario steigen die Werte für Sitz A um bis zu +21 %. Der Vergleich bei Sitz B zeigt nur beim gekürzten Szenario 2 einen Ausreißer (+8 %), während die anderen Szenarien um den Wert 0,63 schwanken. Für den Sitz C sinken ebenfalls die Werte. Die Unterschiede zum Referenzszenario betragen zwischen -13 bis -22 %.

Insgesamt werden die niedrigsten Werte für den Gangplatz beim Referenzszenario, für den Mittelplatz beim Szenario 3 und beim Fensterplatz für das Szenario 2 erzielt. Bei den gezeigten Ergebnissen für die Zielfunktionen beziehen sich die Zahlen auf die gemittelten Werte aus den einzelnen Zielfunktionen der jeweiligen PSU-Funktionen. Im folgenden werden daher diese getrennt voneinander aufgeführt. Abbildung 5.11 stellt die Ergebnisse für den Gangplatz aufgeschlüsselt nach der Erreichbarkeit der Sauerstoffmasken, der Leselichter und des Flugbegleiterrufknopfs sowie der Wahrnehmung der indiv. Belüftung dar. Aus den Säulendiagrammen geht hervor, dass bei einem Großteil der Ergebnisse der Wert 1 deutlich überschritten wird. Tendenziell erreicht das Szenario 2 bei den gezeigten Säulendiagrammen die höchsten Werte für die Zielfunktionen. Besonders hohe Ausschläge sind bei der individuellen Belüftung zu erkennen. Bei dieser erhöht sich der Wert für das Szenario 2 um +24 %. Es fällt außerdem auf, dass sich die Erreichbarkeit der Sauerstoffmasken für den Gangplatz deutlich verringern und die Werte steigen (+36 %). Diese schwanken bei den drei neuen Szenarien um den Wert 1. Während bei den Szenarien 1 und 2 eine Erhöhung der Werte im Gegensatz zum Referenzszenario sichtbar ist, verringern sich für den Sitz A beim Szenario 3 die Werte für die Leselichter und den Flugbegleiterrufknopf. Eine Reduzierung um -9 % wird sichtbar. Insgesamt steigen jedoch die Ergebnisse für den Sitz A und spiegeln damit die Tendenz der Werte aus Abbildung 5.10 wieder. Das Szenario 3 mit den zwei Versorgungskanälen erzielt nach dem Referenzszenario die geringsten Werte.

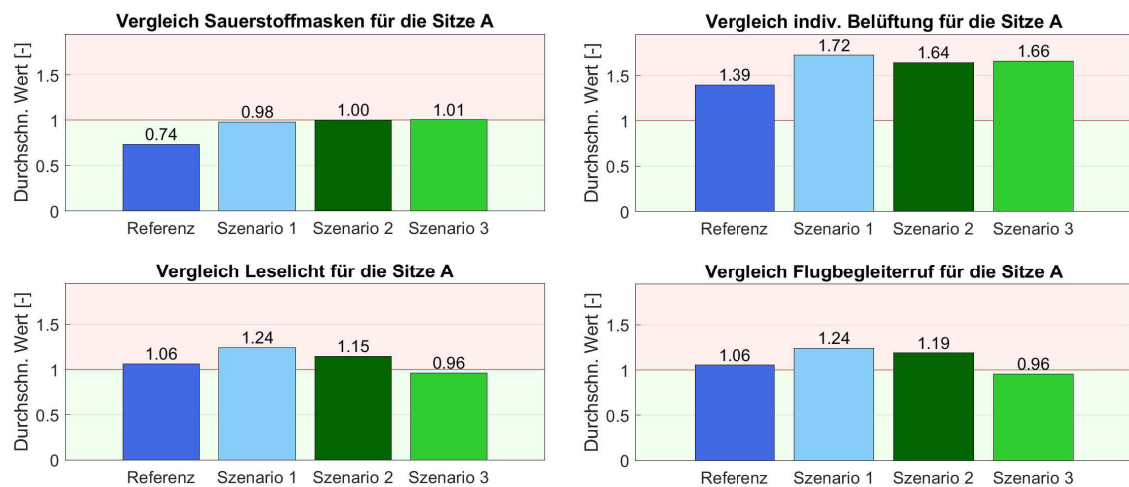


Abbildung 5.11: Vergleich der einzelnen Zielfunktionen für den Sitz A bei allen Szenarien

In der Abbildung 5.12 sind die durchschnittlichen Werte für die vier Zielfunktionen bei dem Sitz B aufgeführt. Die Graphen zeigen tendenziell nur eine geringe Varianz zwischen den Werten. Der prozentual stärkste Unterschied ist bei den Sauerstoffmasken zu sehen. Dort haben sich die Werte nahezu um +52 % erhöht, liegen aber

dennoch deutlich unter dem Wert 1 für den maximalen Abstand zum Passagier. Die Werte bei der Belüftung variieren nur gering, lediglich beim Szenario 2 ist ein deutlich erhöhter Wert vorzufinden (+11 %). Bei den Leselichtern und dem Flugbegleiterrufknopf sind hingegen leichte Verbesserungen bei den Szenarien 2 und 3 verglichen mit dem Referenzszenario zu sehen. Die Werte reduzieren sich um bis zu -12 %. Insgesamt erzielt der Sitz B im Vergleich zu den beiden anderen Plätzen die geringsten Werte für die Zielfunktionen.



Abbildung 5.12: Vergleich der einzelnen Zielfunktionen für den Sitz B bei allen Szenarien

Im Unterschied zu den beiden Sitzen A und B, haben sich die Werte für den Sitz C überall deutlich verringert. Abbildung 5.13 zeigt die Säulendiagramme mit den Ergebnissen der Zielfunktionen. Besonders die Erreichbarkeit der Sauerstoffmasken



Abbildung 5.13: Vergleich der einzelnen Zielfunktionen für den Sitz C bei allen Szenarien

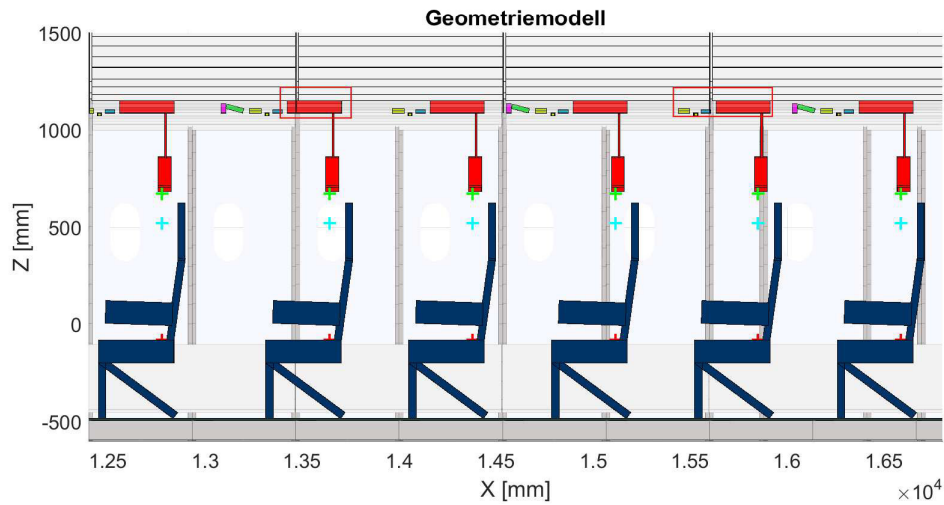
oder die Wahrnehmung der Belüftung hat sich verändert - eine Reduzierung der Werte um bis zu 24 %. Für die Leselichter und den Flugbegleiterrufknopf werden bei dem Szenario 1 und 2 jeweils Werte unter 1 erreicht. Währenddessen haben sich die Werte für das Szenario 3 nur geringfügig im Vergleich zum Referenzszenario verändert (-2 %). Gesamt betrachtet erzielt das Szenario 2 mit dem LBin und der gekürzten Variante der PSU für den Fensterplatz die besten Ergebnisse. Im Gegensatz dazu erreicht das Referenzszenario bei allen vier Zielfunktionen die höchsten Werte.

### 5.2.2 Ergebnisse Montagekostenmodell

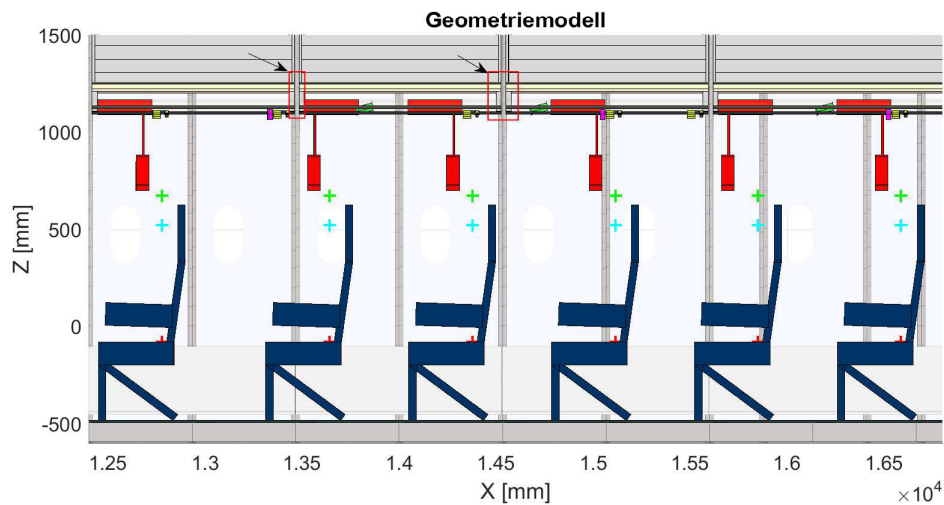
Die geometrische Betrachtung gibt nur einen Einblick in die Bewertung neuer Konzepte in der Kabine. Ein weiterer und auch wichtiger Aspekt in der Bewertung ist die Betrachtung der Montagekosten. Unter Berücksichtigung der Lücken zwischen den Gepäckablagen kann die PSU bereits während der Vormontage eingebaut und damit Zeit sowie Kosten in der Endmontage einsparen. Die beiden folgenden Abbildungen zeigen eine Seitenansicht für das Referenzszenario (Abb. 5.14a) und das Szenario 3 (Abb. 5.14b). Zur besseren Darstellung wurden die Seitenwände der Gepäckablagen auf transparent gestellt und geben den Blick frei auf die Platzierung der PSU-Funktionen.

Aus der ersten Abbildung geht deutlich hervor, dass die PSU bei jedem Sitz gleichmäßig verteilt ist und die äußeren Grenzen der Gepäckablagen überschritten werden (roter Kasten). Im Gegensatz dazu, ändert sich das Layout der PSU bei der Anordnung im Szenario 3. Die einzelnen Elemente werden so angeordnet, dass sich diese innerhalb der Grenzen eines OHSC befinden und damit eine Vormontage ermöglichen. Die Lücken zwischen den Gepäckablagen bleiben frei (siehe Pfeil und roter Kasten). Bei dem Referenzszenario ist ebenfalls zu sehen, dass einige Einheiten innerhalb der Gepäckgrenzen liegen und somit für die Vormontage geeignet wären. Allerdings überschreiten mehr als 20 % der PSUs die Lücken, sodass sich eine Vormontage finanziell nicht lohnen würde und einen Mehraufwand produzieren würde, der sich mit dem Einsparpotenzial aufheben würde. Es wird daher angenommen, dass alle Einheiten für das Referenzszenario während der Endmontage verbaut werden müssen.

Wie bereits im Abschnitt 4.3 vorgestellt, kann die benötigte Gesamtzeit für den Einbau der Passagier Service Einheiten berechnet werden, die unter der Annahme, proportional zu den Kosten ist. Dies führt zu den folgenden Ergebnissen bei den untersuchten Szenarien und sind in der Tabelle 5.3 aufgeführt.



(a) Referenzszenario mit ECBin ohne Lücke



(b) Szenario 3 mit LBin und Berücksichtigung der Lücken

Abbildung 5.14: Gegenüberstellung zweier Szenarien unter Berücksichtigung der Vormontage

Insgesamt sind 60 Passagier Service Einheiten für die Kabinenausstattung verbaut. Die für die Berechnung angenommen Zeitwerte der einzelnen Arbeitsschritte sind im Anhang A.3 aufgelistet. Für das Referenzszenario einer A320 wird zum Anschluss der PSU während der Endmontage erfahrungsgemäß ein NVA-Faktor von 70 % angenommen, sodass sich eine Gesamtzeit von  $Z_K = 29,1$  h ergibt. Das Szenario 2 erzielt den gleichen Wert für die Gesamtzeit bei der Montage der PSU, da dieses Konzept ebenfalls nicht vormontierbar ist. Die benötigte Zeit pro Montage der PSU während der Endmontage beträgt 48,45 IM.

Die Szenarien 2 und 3 haben die Anforderung an die Platzierung der Passagier Service Einheit, dass diese innerhalb der Vormontage eingebaut werden können. Der Einbau erfolgt dann an Fertigungsinseln, sodass die Zeiten pro Arbeitsschritt durch das bereitliegende Werkzeug verringert werden und der Transport der PSU zum Einbauort entfällt. Insgesamt verkürzen sich dadurch die Arbeitszeiten im gesamten



Szenario	NVA [%]	Zeit pro PSU [IM]	Gesamtzeit [h]
Referenz	70	48,45	29,1
1	70	48,45	29,1
2	20	15,6	9,36
3	20	15,6	9,36

Tabelle 5.3: Ergebnisse der Zielfunktionen für die Montagekostenbewertung

Prozessablauf. Infolgedessen ergibt sich ein Non-Value Adding-Faktor von 20 % und eine Zeit von 15,6 IM für den Einbau und den Anschluss einer PSU in den Versorgungskanal der Gepäckablage. Damit ist die benötigte Einbauzeit pro PSU um 67,8 % geringer als bei den beiden nicht vormontierbaren Szenarien. Eine Umrechnung des Wertes ergibt eine Gesamtzeit für die Montage von 9,36 h.



## 6. Diskussion

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Zielfunktionen und die Anwendung eines methodischen Entwurfsansatzes für die Auslegung von Flugzeugkabinen diskutiert. Ebenfalls wird der objektorientierte Ansatz näher erörtert.

### 6.1 Bewertung der Ergebnisse

Im Rahmen dieser Arbeit werden eine Auslegungssystematik zur Platzierung der Kern-Elemente einer PSU entwickelt und Modelle für die Analysen aufgebaut. Mit diesem können daraufhin vier verschiedene Konzepte zur Anordnung der PSU-Funktionen untersucht und bewertet werden. Dabei stellt das Referenzszenario den heutigen Stand der Technik dar. Bei allen vier untersuchten Szenarien werden die Kern-Elemente nur in den jeweiligen Passagier Service Kanälen angebracht.

Die deutlichsten Veränderungen anhand der Ergebnisse für den Passagierkomfort sind bei den Sitzen A und C vorzufinden. Begründet ist dies in der Geometrie der Gepäckablage. Beim LBin befindet sich der Passagier Service Kanal, in dem die Funktionen angeordnet wurden, nicht mehr mittig über dem Sitz B, sondern wandert in die äußere Richtung zum Fenster. Dadurch verlagert sich die Erreichbarkeit zu besseren Werten für den Sitz C und erhöht den Abstand zum Sitz A. Die Erreichbarkeit der Funktionen wird damit für den Passagier auf dem Gangplatz erschwert. Tabelle 6.1 zeigt diese Tendenz anhand der prozentualen Veränderungen zum Referenzszenario für die Ergebnisse der Zielfunktion. Eine Zunahme des Wertes bedeutet eine Verschlechterung während die Abnahme eine bessere Griffweite oder Wahrnehmung für den Passagier darstellt.

Die Ergebnisse beim Sitz A für die drei neuen Szenarien überschreiten bei fast allen Zielfunktionen den Wert 1 und somit den Maximalabstand. Begründet ist dies zum einen durch die neue Gepäckablage und der Verschiebung des PSCs zum Fensterplatz. Zum anderen werden bei den Szenarien 2 und 3 die Lücken zwischen den Gepäckablagen berücksichtigt. Dadurch ändert sich die Anordnung der einzelnen PSU-Funktionen und damit auch die Entfernung zu dem Passagier. Es zeigt sich

Szenario	Sitz A [%]	Sitz B [%]	Sitz C [%]
Referenz	-	-	-
1	+21	+7,6	-13,5
2	+12,6	-4,5	-22,5
3	+4,6	-6,0	-13,5

Tabelle 6.1: Prozentuale Veränderungen zum Referenzszenario für die Sitztypen A, B und C

jedoch auch, dass eine Verlagerung einiger Funktionen in einen zweiten Passagier Service Kanal dem entgegen wirken kann und beim Szenario 3 bessere Werte für die indiv. Beleuchtung sowie den Flugbegleiterrufknopf ermöglicht.

Für den Sitz B sind nur marginale Veränderungen sichtbar. Die Werte bei der Belüftung variieren nur gering und die der Sauerstoffmasken haben sich zwar verschlechtert, erfüllen aber deutlich die Anforderungen an die Erreichbarkeit für den Passagier. Lediglich beim Szenario 2 wird der Grenzwert bei der indiv. Belüftung deutlich überschritten, aufgrund der Verschiebung des Kanals unterhalb des LBins. Das Szenario 3 zeigt hier ebenfalls insgesamt die besten Ergebnisse aufgrund der Verteilung der PSU-Funktionen auf zwei Passagier Service Kanäle.

Bei dem Fensterplatz werden insgesamt die geringsten Werte für alle drei Szenarien im Vergleich zum Referenzszenario erzielt. Besonders die gekürzte Variante im Szenario 2 erreicht die besten Ergebnisse. Durch die Verlagerung des Passagier Service Kanals können trotz der Berücksichtigung der Lücken zwischen den Gepäckablagen sehr gute Werte für die Erreichbarkeit ermittelt werden.

Die Ergebnisse für die Montagekosten bzw. benötigten Zeitstunden für den Einbau und Anschluss der Passagier Service Einheiten zeigen, dass bei einer Vormontage rund zweidrittel eingespart werden können. Aufgrund der Montage an einer Fertigungsinsel stehen dem Monteur bereits die einzelnen Bauteile und Werkzeuge vor Ort zur Verfügung. Dadurch lässt sich die PSU schneller montieren und die Kabel für die elektrische oder digitale Versorgung leichter verlegen.

Das heutige PSU-Konzept bietet insgesamt gute Ergebnisse, aber auch die Nutzung von neuen Gepäckablagen oder einer kompakteren Bauweise der PSU zeigen Vorteile auf. Ausgehend vom Referenzszenario bietet der Einbau einer neuen Gepäckablage für den Fensterplatz deutlichere Vorteile in der Erreichbarkeit der PSU-Funktionen allerdings zum Nachteil des Gangplatzes. Durch die Verteilung der Passagier Service Funktionen auf zwei Kanäle kann dieser Verschiebung entgegen gewirkt werden und bietet dem Flugzeugausstatter eine Möglichkeit allen Passagieren dennoch einen gewissen Komfort bei der Bedienung der PSU-Funktionen zu gewährleisten. Basierend auf den gezeigten Ergebnissen wird aus der Sicht der Airline und des OEMs das Sze-

nario 3 mit zwei Versorgungskanälen empfohlen und bietet neben dem gewohnten Komfort für den Passagier große Einsparpotenziale bei den Montagekosten.

Die Ergebnisse und Beobachtungen zeigen eine hinreichende Genauigkeit für die Bewertung von neuen Konzepten für die Platzierung der PSU-Funktionen in einer Flugzeugkabine. Die getroffenen Annahmen ermöglichen in einer ersten Betrachtung aussagekräftige Ergebnisse, sollten aber für weiterführende Analysen erweitert und ausgebaut werden. Zusätzliche Faktoren wie z.B. die Betrachtung der Stromversorgung und das damit zusammenhängende Kabelgewicht könnten neue Aspekte liefern. Die entwickelte Programmierung bietet dafür bereits Schnittstellen und wird in den nächsten Abschnitten genauer beleuchtet.

## 6.2 Diskussion des modellbasierten Entwurfsansatzes

Modellbasierte Lösungsansätze sind geeignet für das Design komplexer Produkte und werden zunehmend auch für die Entwicklung von Flugzeugen eingesetzt. Für die Beschreibung und Analyse mit zusätzlicher Bewertung neuer innovativer Kabinenkonzepte und ihren Beziehungen zu anderen Flugzeugsystemen bewährt sich der MBSE-Ansatz. Modelle ermöglichen die Ansicht eines Systems auf verschiedenen Abstraktionsebenen, sodass sich komplexe Zusammenhänge besser verstehen lassen. Zudem werden Schnittstellen zu weiteren Flugzeugkomponenten sichtbar, wodurch das Zurückverfolgen von Anforderungen in stark vernetzten Systemen sichergestellt ist.

Einen weiteren Vorteil stellt die Verwendung von Modellierungssprachen dar, die das Model-based Systems Engineering für die Herleitung von Modellen bereitstellt. Beim Entwurf eines neuen Systems geht es anfangs um die wesentlichen Aspekte. Bei der Benutzung formaler Sprachen steht die mathematische Verwendung und nicht die Kommunikation im Vordergrund. Dadurch sind diese Methoden oft schwer verständlich und die Masse an Details steigt schnell an. Im Gegensatz dazu bietet die grafische Sprache eine leichtere Kommunikation zwischen verschiedenen Anwendern der Methode und reduziert die Informationen auf das Wesentliche. Grafische Elemente gewährleisten zudem eine unmissverständliche Definition. In dieser Arbeit hat sich die Anwendung von UML zur Unterstützung beim Schreiben des Programmcodes und der Herleitung der Modelle bewährt. Durch die bildliche Untergliederung der Flugzeugkabine in seine wesentlichen Komponenten, kann die Komplexität reduziert und dennoch die wichtigsten Details klar und eindeutig dargestellt werden. Schnittstellen und Anforderungen für eine hinreichend genaue Abbildung der Flugzeugka-

bine im Hinblick auf die Passagier Service Einheit können dadurch erfasst werden. Des Weiteren stellt UML für die Beschreibung der objektorientierten Programmierung Methoden bereit und eignet sich dadurch besonders für die Kommunikation im Team. Das Klassendiagramm gibt für Anwender einen schnellen Überblick und Auskunft über die im System verwendete Abstraktion. Für zukünftige Erweiterungen des Programmcodes oder der Einbindung neuer Modelle ist dies hilfreich.

Neben der visuellen Unterstützung bei der Programmierung werden mit Hilfe des modellbasierten Lösungsansatzes insgesamt sechs Modelle entwickelt. Diese sind das Kabinengeometrie-, Montagekosten-, Ontologie-, Funktionalitäten-, Anforderungsmodell und das Modell des Menschen. Damit werden die strukturellen Grundlagen für die Flugzeugkabine gelegt. Der Fokus bei der Auslegung liegt dabei auf der Abbildung der Passagier Service Einheit, um bereits einige Schnittstellen und Wechselwirkungen zu anderen Kabinenelementen aufzuzeigen. In Folgearbeiten kann dann auf den in dieser Arbeit erstellten Grundlagen das Kabinenmodell weiter ausgebaut werden.

Die grundlegenden Strukturen sowie der Aufbau eines Flugzeugs werden in einem Geometriemodell abgebildet. Aus diesem können mit dem Ontologiemodell die Hierarchien und Abhängigkeiten der einzelnen Baugruppen ermittelt und Zugehörigkeiten der Flugzeugkomponenten abgegrenzt werden. Mit der Fokussierung auf die Auslegung und Platzierung der Passagier Service Funktionen werden weitere Modelle implementiert. Mit einem Funktionalitätenmodell lassen sich die Schnittstellen und Wechselwirkungen der PSU zu anderen Kabinensystemen aufzeigen. Dadurch können Anschlüsse und Anforderungen für die Auslegung ermittelt und Optimierungspunkte gefunden werden. Zusätzlich wird ein Anforderungsmodell verwendet, in dem die Ziele und Wünsche an das spätere Kabinenszenario festgehalten und bei der Platzierung der Kern-Elemente der PSU berücksichtigt werden. Somit können bereits im Vorentwurf erste zuverlässige Aussagen über den Passagierkomfort oder mögliche Einsparpotenziale bei der Montage getroffen werden. Für die Bewertung werden daher ein Montagekostenmodell und ein Modell für die Abbildung des Menschen genutzt. Ersteres bildet die Zeitersparnisse bei der Vor- oder Endmontage ab. In einem nächsten Schritt könnte dieses weiter ausgebaut werden und zusätzliche Faktoren wie Zeitersparnisse beim Kabelrouting, Herstellungskosten oder Einnahmen durch Serviceangebote beinhalten. Für die Bewertung des Passagierkomforts werden die anthropometrischen Daten eines durchschnittlichen europäischen Menschen verwendet. Die getroffenen Annahmen liefern erste gute Ergebnisse und über die Normalverteilung der Körpermaße können ebenfalls Aussagen für das 5. oder 95. Perzentil getroffen werden. Darauf aufbauend kann in einem nächsten Schritt eine Optimierung für die Platzierung der Passagier Service Funktionen mit den Zielfunktionen durchgeführt werden.

Insgesamt zeigt der MBSE-Ansatz in dieser Arbeit motivierende Ergebnisse. Aufbauend auf den erstellten Datenmodellen können zukünftig weitere Modelle hinzugefügt werden, um die Flugzeugkabine vollständig abzubilden und eine frühzeitige Bewertung neuer Kabinenszenarien zu ermöglichen.

## 6.3 Diskussion des objektorientierten Ansatzes für die Kabinengestaltung

Für den strukturellen Aufbau der gesamten Kabine insbesondere der Passenger Service Einheit wird ein objektorientierter Ansatz gewählt. Dabei werden die einzelnen Flugzeugkomponenten in Klassen und deren Objekte aufgegliedert. Die Erzeugung einzelner Objekte erfolgt entsprechend einer Top-Down-Hierarchie. Begonnen wird mit dem gesamten Flugzeugmodell, das mit zunehmender Ebenentiefe detaillierter in die einzelnen Komponenten und Systeme unterteilt wird. Jedes erzeugte Objekt ist dabei durch sein Verhalten und seine Eigenschaften identifizierbar. Dadurch können die Abhängigkeiten und Schnittstellen zwischen den einzelnen Kabinenelementen dargestellt werden und liefern die Daten für das Ontologiemodell. Besonders für die Betrachtung der Anbindung bzw. woher die Randbedingungen für die Auslegung der Bauteile stammen, kann dadurch nachverfolgt werden. So gibt beispielsweise die Gepäckablage über die Abmaße des Passagier Service Kanals den zur Verfügung stehenden Bauraum für die Auslegung der PSU vor. Für jedes erstellte Kabinenszenario kann dadurch die zugehörige Ontologie erzeugt werden und könnte zukünftig eine Schnittstelle für die Erstellung von Montageanleitungen bieten. Durch die Verbindungen zwischen den einzelnen Komponenten können die Anschlüsse der Kabinenelemente abgeleitet werden. Aufgrund der objektorientierten Programmierung lassen sich zudem in den einzelnen Objekten weitere Informationen, wie die Partnummern, hinterlegen. Im Zusammenspiel mit der vordefinierten Reihenfolge zur Erzeugung der Kabinenobjekte (siehe Abbildung 4.8) und den genannten Wechselwirkungen, könnte eine Logik implementiert werden, die je nach gewünschtem Kabinenszenario automatisch eine entsprechende Montageanleitung darauf aufbauend erstellt.

Ein weiterer Vorteil der objektorientierten Programmierung stellt die Vererbung dar. Aufgrund dieser kann die Konsistenz der Merkmale für die Objekte innerhalb der Kabine sichergestellt werden. Neue Anwender der in dieser Arbeit implementierten Programmierung können auf diesem Grundmodell aufbauen und bereits implementierte Methoden und Eigenschaften nutzen ohne unnötige Redundanzen zu erzeugen. Zudem ermöglicht der einheitliche und übersichtliche Programmierstil für andere Anwender eine schnelle Nachvollziehbarkeit. Programmergänzungen und Änderungen innerhalb der Klassen können mit weniger Aufwand vorgenommen werden. Aufgrund

der Vererbung übertragen sich diese Änderungen direkt auf alle abhängigen Objekte und Klassen. Des Weiteren kann mit Hilfe der Kombination einfacher Basisfunktionen ein komplexes System verwirklicht werden.

Die steigende Komplexität beim Flugzeugentwurf führt zu einer zunehmenden Datenmenge. Darüber hinaus wird in immer großen Teams gearbeitet, die vielfältige Software und Tools für die einzelnen Analysen einsetzen. Dies kann zu Inkompatibilitäten, Informationsverlust oder speicherintensiver Übertragung der Daten führen. Der objektorientierte Ansatz kann hierbei entgegenwirken, indem ein zentrales Datenmodell mit Repository generiert wird und Programmcode reduziert wird. Bei der Erzeugung der Kabine werden in den jeweiligen Objekten die Daten und Informationen abgespeichert. Dadurch sind diese kompakt an einem Ort gespeichert und können individuell abgerufen sowie visualisiert werden. Zudem verfügt die Programmierung über Schnittstellen, mit denen die Informationen weitergegeben werden können, damit andere Teams mit dem generierten Wissen weiterarbeiten können. Somit könnte beispielhaft über eine xml-Schnittstelle eine Verbindung zu bereits existierender Software wie CPACS implementiert werden, um die Beschreibung der Kabine für die Auslegung weiter auszubauen.

Eine dieser Schnittstellen ist zur Visualisierung des 3D-Kabinenmodells implementiert. Die generierte Programmierung ermöglicht darüber ein Exportieren des erzeugten Flugzeugmodells in STL-Dateien. Die STL-Schnittstelle ist eine Standardschnittstelle für viele CAD-Systeme und stellt geometrische Informationen für die Fertigung, wie z.B. den 3D-Druck, bereit. Das Format beschreibt mit Hilfe von Dreiecksfacetten die Oberfläche von 3D-Körpern. Dafür werden die Positionen der einzelnen Knotenpunkte (engl.: *Vertices*) sowie die Verbindungen der Punkte zu einer Fläche (engl.: *Faces*) benötigt.

Beim Erstellen des Geometriemodells werden bereits die Oberflächendaten der einzelnen Elemente erzeugt und in den Objekten abgespeichert. Diese sind für die grafische Darstellung in MATLAB<sup>®</sup> notwendig und können ebenfalls für das STL-Format verwendet werden. Dafür muss allerdings vorher sichergestellt werden, dass die Faces ein Nx3-Format aufweisen, da nur Dreiecksflächen von der Software gelesen werden können. Eine integrierte Funktion innerhalb der Programmierung wandelt für alle Objekte die Faces in das passende Format um und exportiert diese anschließend in ein STL-File. Diese können dann mit einer entsprechenden Software weiterverarbeitet werden. Die folgenden zwei Abbildungen zeigen das exportierte Flugzeug- und Kabinenmodell für das Referenzszenario. Für die Darstellung wird die freie 3D-Grafiksoftware BLENDER<sup>®</sup> von Blender Foundation in der Version 2.79b verwendet [31].



Abbildung 6.1 zeigt eine Außenansicht des Flugzeugs, während Abbildung 6.2 einen Einblick in die Kabine mit dem verwendeten Referenzszenario für die Anordnung der PSU-Funktionen gibt. Dieses Format eignet sich besonders gut für eine realistische Darstellung der Kabine und ermöglicht 3D-Anwendungen für Virtual Reality (VR). Dadurch besteht die Möglichkeit, neue Konzepte zum einen realistisch zu visualisieren und zum anderen für den Kunden erlebbar zu machen. Das Modell mitsamt der enthaltenen geometrischen Elemente kann somit auch in andere Domänen importiert werden, um das generierte Wissen effizient wiederzuverwenden, wie z.B. für die Montagezeichnung und -anleitung.

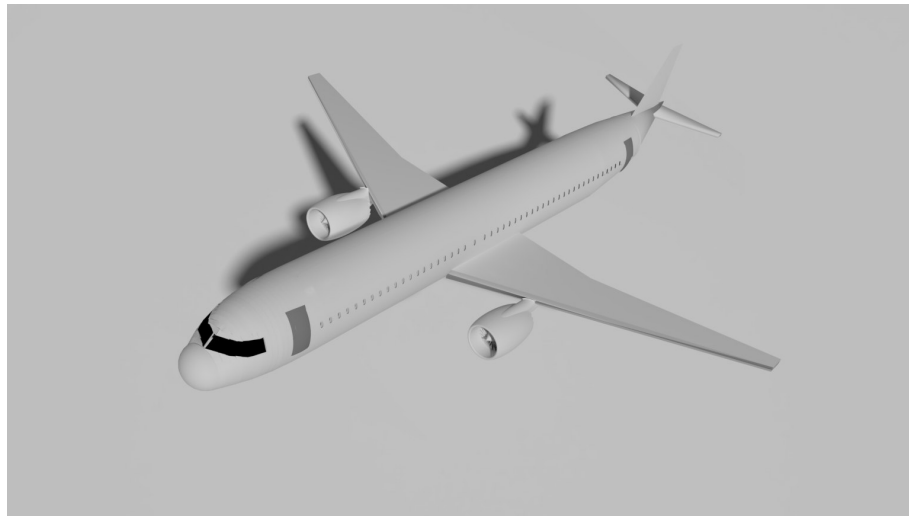


Abbildung 6.1: Gerenderte Darstellung des Flugzeugs in BLENDER®



Abbildung 6.2: Gerenderte Darstellung der Kabine in BLENDER®

Durch die objektorientierte Programmierung wird eine evolutionäre Arbeitsweise unterstützt, d.h. das schrittweise Ausbauen eines Programms und die Kompatibilität zu älteren Programmversionen lässt sich einfacher gewährleisten. Aufbauend

auf den in dieser Arbeit entwickelten strukturellen Grundlagen für die Flugzeugkabine können als nächstes die Feinheiten, wie z.B. die differenzierte Unterteilung in Primär- und Sekundärstruktur bei den Fensterstrukturen, weiter ausgebaut werden. Durch die Fokussierung auf die Passagier Service Einheit können bereits erste Schnittstellen und Wechselwirkungen zu anderen Kabinenelementen aufgezeigt und implementiert werden. Diese sind unter anderem die Anbindung an die elektrische Stromverteilung oder das digitale Datenbussystem. Dies kann eine Anleitung für aufbauende Folgearbeiten zum Umgang mit dem Model-based Systems Engineering Ansatz liefern.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Im Jahr 2002 wurde durch die Veröffentlichung der Vision 2020 durch ACARE ein Fahrplan für die Entwicklung der europäischen Luftfahrtbranche vorgelegt. Dieser beinhaltet verschiedene Ziele zum Erreichen eines effizienteren, komfortableren und nachhaltigerem Flugverkehrs. Das Institut für Lufttransportsysteme beteiligt sich zusammen mit dem DLR bei der Umsetzung der Ziele und forscht unter anderem an innovativen Methoden für eine ganzheitliche Betrachtung der Flugzeugkabine bereits im Vorentwurf, wie dem Model-based Systems Engineering Ansatz. Der modellbasierte Ansatz stellt eine geeignete Entwurfsmethodik auf dem Gebiet des Flugzeugdesigns dar, um die Entwicklung neuartiger Konzepte zu unterstützen. Dadurch besteht die Möglichkeit mehr Wissen in der Entwurfsphase einzubringen und Anforderungen eines Stakeholders im Vorentwurf zu berücksichtigen. Eine Bewertung neuer Kabinenkonzepte hinsichtlich Komfort oder Kosteneinsparungen kann dann bereits frühzeitig vorgenommen werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde daher der Methodische Entwurfsansatz für die Auslegung der Kabinengestaltung mit Fokussierung auf die Passagier Service Einheit untersucht. Zuerst wurden in einer Literaturrecherche die Anforderungen an die PSU-Auslegung und die Wechselwirkungen innerhalb der Kabine identifiziert. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden sechs Modelle generiert, die das Gesamtsystem der PSU sowie die Grundstrukturen der Kabine abbilden. Für die Modellierung der Struktur sowie für die Visualisierung wurde ein Geometriemodell der Kabinen- und PSU-Komponenten verwendet. Für die Darstellung der Schnittstellen zu anderen Teilsystemen der Kabine oder der Interaktion mit dem Passagier wurde ein Funktionalitätenmodell erstellt. Zusätzlich diente eine Ontologie zum Aufzeigen der Komponentenhierarchie. Sowohl für die Bewertung als auch für eine regelbasierte Anordnung der Passagier Service Funktionen wurden drei weitere Modelle erstellt. Zum einen erfasste ein Montagekostenmodell potenzielle Einsparungen bei der Vormontage. Zum Anderen wurde für die Betrachtung des Passagierkomforts ein Modell des Menschen herangezogen. Dieses bildete die Erreichbarkeit, die Sprachverständlichkeit, Lesbarkeit und das Luftströmempfinden des Passagiers ab und diente zur Ableitung einer Zielfunktion. In einem Anforderungsmodell wurden die Ziele des

Stakeholders festgehalten. Basierend auf diesen Anforderungen an die Auslegung der PSU und unter Berücksichtigung der aufgestellten Regeln für die Mensch-PSU-Interaktion konnte dann die Passagier Service Einheit innerhalb der Kabine platziert werden. Die Modellierungssprache UML wurde für die Dokumentation und zur Herleitung der Modelle verwendet. Die Programmierung erfolgte mit der kommerziellen Software MATLAB<sup>®</sup>, mit der ebenfalls ein 3D-Modell zur Visualisierung der Ergebnisse erstellt wurde.

Abschließend wurde mit Hilfe der entwickelten Methodik und der Wissensdatenbank ein Kabinenmodell basierend auf einer A320 als Referenz zum Vergleich neuer Konzepte erzeugt. Dem gegenüber wurden drei weitere Szenarien für die Auslegung der PSU-Funktionen gestellt. Variiert wurden zum einen die Geometrien der Gepäckablage und die Anzahl der Passagier Service Kanäle, zum anderen die Anforderungen an eine mögliche Vormontage. Trotz der disruptiven Änderungen bei den untersuchten Konzepten sind die Ergebnisse der Zielfunktionen miteinander vergleichbar gewesen. Es zeigte sich in den Ergebnissen, dass bei der Verwendung einer Gepäckablage mit zwei Kanälen Einsparpotenziale bei der Montage möglich sind ohne dabei den Passagierkomfort merklich zu beeinträchtigen. Folglich war es dank des modellbasierten Ansatz möglich, eine umfangreiche Wissensdatenbank zu generieren, die gute Ergebnisse erzielte und auch verschiedene Konzepte bewertbar machte. Zudem verfügt die Programmierung über eine Schnittstelle zum Export für CAD-Programme oder 3D-Grafiksoftware, sodass eine Weiterverarbeitung der generierten Daten möglich ist.

## Ausblick

Die objektorientierte Programmierung ermöglicht das generierte Kabinenmodell weiter auszubauen und neue Logiken sowie Objekte für eine detailliertere Ausarbeitung der einzelnen Baugruppen in einem Verkehrsflugzeug zu implementieren. Zudem kann zukünftig über eine xml-Schnittstelle der Programmierung in MATLAB<sup>®</sup> eine Anbindung an CPACS erfolgen und die gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit in bereits vorhandene Kabinenmodelle integriert werden.

Im nächsten Schritt kann das generierte Regelwissen zur Anordnung der Passagier Service Funktionen erweitert werden und ist somit für die Durchführung einer Optimierung geeignet. Mit der Entwicklung weiterer Bewertungsmethoden kann dadurch eine Multidisziplinäre Design-Optimierung für die Platzierung der PSU-Funktionen in der Kabine durchgeführt werden. Je nach Anforderung könnte dann das Optimum für die Gestaltung und Platzierung der PSU innerhalb der Kabine gefunden werden.

# Literaturverzeichnis

- [1] ACARE: *Strategic Research Agenda 1 - Executive Summary & Volume 1-2*. URL: <https://www.acare4europe.org>, 2002. – Besucht: November 2018
- [2] SCHOLZ, Prof. Dr.-Ing. D.: *AERO - Aircraft Design and Systems Group*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2012. – Vorlesungsunterlagen
- [3] AIRBUS: *Equipment/Furnishings - Passenger Compartment - Change 150 PAX to 168 PAX*. 2005. – Service Bulletin No. A320-25-1405
- [4] HOFFMANN, Dr. U.: *Die Flugzeugkabine der Zukunft - Was ist heute schon möglich?* Diehl Aerospace GmbH, 2015. – TU Darmstadt, 22. Kolloquium Luftverkehr
- [5] WIRTSCHAFTSWOCHE: *Die wichtigsten Passagierflugzeuge*. URL: <https://www.wiwo.de/bilder/luftfahrt-die-wichtigsten-passagierflugzeuge/4706390.html>, 2008. – Besucht: Oktober 2018
- [6] GOLLNICK, Prof. Dr.-Ing. V.: *Methoden des Flugzeugentwurfs 1*. Institut für Lufttransportsysteme, 2015. – Vorlesungsunterlagen
- [7] FUCHTE, J.: *Fuselage Mass Estimation - Advanced Estimation Techniques*. 2013. – Confidential Level D, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
- [8] GOMBERT, P.: *A320 Family - Electrical Generation and Distribution System*. : Airbus
- [9] NYA, Brice ; BROMBACH, Johannes ; SCHRÖTER, Torben ; SCHULZ, Detlef: Weight evaluation of cabin power architecture on smaller civil aircraft. In: *3rd International Workshop on Aircraft System Technologies AST 2011*, 2011
- [10] THIELECKE, Prof. Dr.-Ing. F.: *Flugzeugsysteme 1 - Elektrische Versorgungssysteme*. Institut für Flugzeug-Systemtechnik, 2015. – Vorlesungsunterlagen
- [11] FUCHTE, J.: *Enhancement of Aircraft Cabin Design Guidelines with Special Consideration of Aircraft Turnaround and Short Range Operations*, Technische Universität Hamburg, Diss., 2014

- [12] REDLOGIX SOFTWARE & SYSTEM ENGINEERING GMBH (Hrsg.): *Airbus - CIDS Kabinenmanagement-System*. URL: <https://www.redlogix.de/de/referenzen/kabinenmanagementsystem-airbus-cids/>; redlogix Software & System Engineering GmbH, 2018. – Besucht: Juni 2018
- [13] GOD, Prof. Dr. R.: *Systems Engineering*. Institut für Flugzeug-Kabinensysteme, 2017. – Vorlesungsunterlagen
- [14] AIRBUS (Hrsg.): *CIDS & Cabin Lighting Configuration Guide*. Issue 2, Rev. 3. : Airbus, 2009. – Seiten 10-33
- [15] LA ROCCA, G: *Knowledge Based Engineering Techniques to Support Aircraft Design and Optimization*, Delft University of Technology, Diss., 2011
- [16] INCOSE SE Vision 2020: *INCOSE-TP-2004-004-02*. Sep. 2007
- [17] ESTEFAN, J. A.: Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies. In: *INCOSE MBSE*. Focus Group, 2008 (Rev. B.). – California, USA
- [18] INC., The M.: *Matlab - Version R2018a*. URL: <https://de.mathworks.com>, 2018. – Besucht: Juli 2018
- [19] FOWLER, Martin ; SCOTT, Kendall: *UML konzentriert - Eine strukturierte Einführung in die Standard-Objektmodellierungssprache*. 2. Auflage. Addison-Wesley Verlag, 2000
- [20] DAWID, Jessica: *Das bedeutet das kleine schwarze Dreieck, das in Flugzeugen über einem Fenster steht*. URL: <https://www.businessinsider.de/das-bedeutet-das-kleine-schwarze-dreieck-das-in-flugzeugen-ueber-einem-fenster-steht-2017-3>, 2017. – Besucht: Juli 2018
- [21] PATTERSON, T.: *CNN - Stalking North Korea's odd Cold War time machines*. URL: <https://edition.cnn.com/travel/article/feat-north-korean-airline-aviation-enthusiasts/index.html>, 2015. – Besucht: Juli 2018
- [22] PUTERBAUGH, R.: *Trans World Airlines Flight 128*. URL: <https://public.fotki.com/Rollie08/aviation-disasters/twa-flight-128/trans-world-airline/880twcabin1jpg.html>, 2009. – Besucht: November 2018
- [23] EASA: *Portable Electronic Devices (PED) on board*. URL: <https://www.easa.europa.eu/easa-and-you/passengers/portable-electronic-devices-ped-board>, 2018. – Besucht: Oktober 2018

- [24] Astronics PECO Inc.: *Passenger Service Units - Aerospace Cabin Interiors*. URL: <https://www.astronics.com/product?productgroup=Interiors%20%26%20Structures&subproduct=passenger%20service%20units>, . – Besucht: September 2018
- [25] EASA: *Certification Specifications for Large Aeroplanes CS-25*. European Aviation Safety Agency, 2007. – Amendment 3
- [26] AIRBUS (Hrsg.): *A318/A319/A320/A321 Flight crew operating manual*. System description 1. : Airbus, 2002
- [27] TXT E-Solutions S.P.A.: *Product Configuration - Pacelab Cabin*. URL: <https://www.txtgroup.com/markets/solutions/pacelab-cabin/>, 2018. – Besucht: Oktober 2018
- [28] DLR: *CPACS*. URL: [https://www.dlr.de/lk/desktopdefault.aspx/tabid-8149/13972\\_read-35497/](https://www.dlr.de/lk/desktopdefault.aspx/tabid-8149/13972_read-35497/), 2018. – Besucht: Oktober 2018
- [29] NAGEL, B. ; BÖHNKE, D. ; V.GOLLNICK ; SCHMOLLGRUBER, P. ; RIZZI, A. ; ROCCA, G. L. ; ALONSO, J.J.: *Communication in Aircraft Design: Can we establish a Common Language?* Brisbane, Australia : 28th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2012
- [30] TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN (Hrsg.): *PadLab - Aircraft Synthesis, Parametric Studies and Optimization - User Guide*. Version: r17.301-v03. : Technische Universität Berlin, 2017. – Institut für Luft- und Raumfahrt, Fachgebiet Luftfahrzeugbau und Leichtbau
- [31] FOUNDATION, Blender: *Blender - Version 2.79b*. URL: <https://www.blender.org/>, 2018. – Besucht: Oktober 2018
- [32] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (Hrsg.): *DIN CEN ISO/TR 7250-2 Wesentliche Maße des menschlichen Körpers für die technische Gestaltung - Teil 2: Anthropometrische Datenbanken einzelner nationaler Bevölkerungen*. : DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2013. – Beuth Verlag - Deutsche Fassung CEN ISO/TR 7250-2:2011 + A1:2013
- [33] SAE THE ENGINEERING SOCIETY FOR ADVANCING MOBILITY LAND SEA AIR AND SPACE: *SAE AIR1390 - Convenient Location of Oxygen Masks for Both the Crew and Passengers of Aircraft*. 1999 (Rev. A). – Forschungsbericht. – Aerospace Information Report
- [34] KOCHAN, Dr. K.: *Wo gibt's im Flugzeug die leisen Sitze?* In: *Stuttgarter Nachrichten* (2017), Dezember. – Besucht: Juli 2018

- [35] BESCHALLUNGSTECHNIK, Leistungsgemeinschaft: *ELA-Info.* : ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. Fachverband Sicherheit. – Seiten 6-7
- [36] BG ETEM (Hrsg.): *Text und Bild - Schriftgröße.* : BG ETEM, 2001. – Seiten 18-19
- [37] MOSER, E. ; ALLIMANT, R.: Technische Untersuchungen an Pflanzenschutzgeräten für den Weinbau. In: *Landtechnische Forschung 19* (1971), S. 134–135. – Universität Hohenheim
- [38] BG ETEM (Hrsg.): *Grundlagen zum Raumklima und zur Raumluftechnik.* : BG ETEM. – S. 7
- [39] SCHOLZ, Prof. Dr.-Ing. D.: *MSME - Flugzeugsysteme.* Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2017. – Vorlesungsunterlagen
- [40] GUNTHER, H.: *Hochauflösende Displays - optimaler Abstand.* URL: <https://blogs.fau.de/displays/2015/10/22/hochaufloesende-displays-optimaler-abstand/>, 2015. – Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Besucht: Juli 2018
- [41] LIEGL, Philipp: *Was ist ein Tier-Supplier oder Tier-Lieferant?* URL: <https://ecosio.com/de/blog/2017/03/10/Was-ist-ein-Tier-Supplier-oder-Tier-Lieferant/>, 2017. – Besucht: Oktober 2018
- [42] SEMMANN, Claudius: *Industrie 4.0: Airbus gestaltet Supply Chain neu.* URL: <https://www.dvz.de/rubriken/digitalisierung/detail/news/industrie-40-airbus-gestaltet-supply-chain-neu.html>, 2018. – Besucht: Oktober 2018
- [43] WUNNER, Tobias: *Matlab Einführung.* URL: <http://www.informatik.uni-ulm.de/ni/Lehre/WS09/NI1/MatlabIntro.pdf>, 2006. – Universität Ulm, Informatik
- [44] Lucid Software Inc.: *Was ist ein UML Diagramm.* URL: <https://www.lucidchart.com/pages/de/was-ist-ein-uml-diagramm>, . – Besucht: September 2018
- [45] Airbus: *Service Bullettin - A318/A319/A320/A321.* 2005
- [46] AIRBUS (Hrsg.): *Maintenance Facility Planning - MFP A321.* Facility Planning Manual. : Airbus, 1992
- [47] Recaro Aircraft Seating GmbH & Co. KG: *Immer gut vernetzt - RECARO BL3530.* URL: <https://www.recaro-as.de/de/flugzeugsitze/economy-class/bl3530.html>, 2018. – Besucht: Oktober 2018



- 
- [48] MIEHLKE, Peter: *Der Fluggastsitz - vom Konzept zum Produkt*.  
URL: [http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text\\_2005\\_10\\_-13\\_Fluggastsitz.pdf](http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text_2005_10_-13_Fluggastsitz.pdf), 2005. – Besucht: Oktober 2018
- [49] ALTO TECHNOLOGIES CORPORATION (Hrsg.): *Aircraft Page/Chime Loudspeaker*. Doc 106509-012-XAXXXDS Rev 4. : Alto Technologies Corporation, 2018. – Loudspeaker 2.5" (57mm), P-12



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Systeme und Abgrenzung im Flugzeugvorentwurf nach [2] . . . . .	1
1.2	Einordnung der Passagier Service Einheit innerhalb der Flugzeugkabine nach [3] . . . . .	2
2.1	Aufbau des Flugzeugrumpfs und der Kabine [7] . . . . .	6
2.2	Zentralisierte elektrische Leistungsverteilung in einer A320 nach [9] . . . . .	8
2.3	Das Kabinenmanagementsystem von AIRBUS mit Ansteuerung der Passagierfunktionen [13] . . . . .	9
2.4	Schematische Anordnung der DEUs in der Kabine [14] . . . . .	10
2.5	Begriffsdefinition der Methodik nach [13] . . . . .	12
2.6	Modelle zur Abbildung des Systems Passagier Service Einheit . . . . .	13
2.7	Struktur der Objektorientierten Programmierung . . . . .	15
3.1	Der Passenger Service Channel in einer A320 [20] . . . . .	17
3.2	Frühere Auslegungsvarianten der PSU . . . . .	19
3.3	Aufbau der Passenger Service Einheit in einer AIRBUS A319-132 von Germanwings <sup>1</sup> . . . . .	20
3.4	Die Passenger Service Unit einer A320-214 von Eurowings <sup>2</sup> . . . . .	22
3.5	Die Passenger Service Unit einer B737 von Astronics PECO Inc. [24] . . . . .	22
3.6	Anforderungen an die Passenger Service Unit . . . . .	23
3.7	Anwendungsfall für die Sauerstoffmasken . . . . .	27
3.8	Anwendungsfall für die Hinweiszeichen . . . . .	28
3.9	Anwendungsfall für die Sprachansagen . . . . .	28
3.10	Anwendungsfall für die individuellen Leselichter . . . . .	29

3.11 Anwendungsfall für den Flugbegleiterruf . . . . .	30
3.12 Anwendungsfall für die individuelle Belüftung . . . . .	30
3.13 Anwendungsfall für das In-flight Entertainment . . . . .	31
3.14 Benutzerinterface von Pacelab Cabin [27] . . . . .	32
3.15 Aufbau der CPACS-Datenstruktur [29] . . . . .	33
3.16 Flugzeugmodell in CATIA mit Kabinenlayout von PadLab [30] . . . . .	34
4.1 Verkettung der angewandten Modelle für die Auslegung der PSU . . . . .	37
4.2 Modell Mensch mit Sitzen und Referenzpunkten in der Kabine . . . . .	38
4.3 Luftaustrittsgeschwindigkeit abhängig von der Entfernung zur Düsen- öffnung . . . . .	42
4.4 Vereinfachte Darstellung der Zulieferkette bei Verkehrsflugzeugen nach [13] . . . . .	46
4.5 Vereinfachter Aufbau des Programmcodes für Klassen und Vererbung . . . . .	48
4.6 Vereinfachtes Klassendiagramm . . . . .	49
4.7 Ausschnitt der Programmierung zur Erzeugung von Belüftungsobjekten . . . . .	50
4.8 Vereinfachtes Aktivitätsdiagramm der Erzeugung des Kabinengeome- triemodells . . . . .	51
4.9 Geometriemodell des Flugzeugs für eine AIRBUS A320 . . . . .	52
4.10 Ontologie der Kabine anhand der ersten Sitzreihe für die rechte Ka- binenseite . . . . .	53
4.11 Funktionalitätenmodell einer beispielhaften Anordnung für die Ver- sorgung . . . . .	54
4.12 Knowledge-based Engineering und der Einfluss des Anforderungsmo- dells auf die Platzierung der PSU . . . . .	55
4.13 Minimalbeispiel zur Anordnung der PSU-Funktionen im Passagier Service Kanal . . . . .	56
5.1 Darstellung des Referenzszenarios und den drei Szenarien mit ihren Anforderungen an die Platzierung der PSU . . . . .	60
5.2 Gegenüberstellung der zwei verwendeten Gepäckablagen . . . . .	61

5.3	Anordnung der Passagier Service Funktionen für das Referenzszenario von AIRBUS . . . . .	63
5.4	Anordnung der Passagier Service Funktionen für das Szenario 1 . . .	64
5.5	Anordnung der Passagier Service Funktionen für das Szenario 2 . . .	66
5.6	Anordnung der Passagier Service Funktionen für das Szenario 3 . . .	66
5.7	Bewertung des Passagierkomforts mit dem Modell des Menschen . . .	67
5.8	Ergebnisse der Zielfunktionen für die vier untersuchten Szenarien für den Passagierkomfort (dunkelblau) und die Montagekosten (hellblau)	68
5.9	Vergleich der Mittelwerte für alle Szenarien inkl. des Referenzszenarios	69
5.10	Vergleich der Mittelwerte für die Sitze A, B und C bei allen Szenarien sowie des Referenzszenario . . . . .	70
5.11	Vergleich der einzelnen Zielfunktionen für den Sitz A bei allen Szenarien	71
5.12	Vergleich der einzelnen Zielfunktionen für den Sitz B bei allen Szenarien	72
5.13	Vergleich der einzelnen Zielfunktionen für den Sitz C bei allen Szenarien	72
5.14	Gegenüberstellung zweier Szenarien unter Berücksichtigung der Vor- montage . . . . .	74
6.1	Gerenderte Darstellung des Flugzeugs in BLENDER® . . . . .	83
6.2	Gerenderte Darstellung der Kabine in BLENDER® . . . . .	83
A.1	Kabinenmodell . . . . .	102
A.2	Geometriemodell des Flugzeugs als Grundlage für die Betrachtung der Passagier Service Einheiten in der Kabine . . . . .	103
A.3	Annahmen der Arbeitszeiten für den Einbau der PSU in die Kabine während Vor- und Endmontage . . . . .	104
A.4	Bewertungsmatrix mit den Ergebnissen für alle Sitze der rechten Kabinenseite, beispielhaft für das Referenzmodell dargestellt . . . . .	106
A.5	Vergleich der Hinweiszeichen und Lautsprecher für den Sitz A bei allen Szenarien . . . . .	107
A.6	Vergleich der Hinweiszeichen und Lautsprecher für den Sitz B bei allen Szenarien . . . . .	107
A.7	Vergleich der Hinweiszeichen und Lautsprecher für den Sitz C bei allen Szenarien . . . . .	107

A.8	Darstellung der haptischen Interaktion zwischen Passagier und den Funktionen der PSU, beispielhaft für eine Sitzreihe dargestellt . . . .	108
A.9	Funktionalitätenmodell am Beispiel von Szenario 2 für die visuelle und akustische Interaktion . . . . .	108

# Tabellenverzeichnis

3.1	Relevante Kapitel der CS-25 für die Passagier Service Einheit [25] . . .	24
4.1	Verwendete Körperabmaße aus der DIN-Norm [32] . . . . .	38
4.2	Schalldruckpegelabnahme abhängig vom Abstand zur Quelle [35] . . .	40
5.1	Annahmen für das Referenzszenario eines AIRBUS A320 [45] . . . . .	62
5.2	Randbedingungen für Szenario 2 . . . . .	65
5.3	Ergebnisse der Zielfunktionen für die Montagekostenbewertung . . . .	75
6.1	Prozentuale Veränderungen zum Referenzszenario für die Sitztypen A, B und C . . . . .	78
A.1	Annahmen für die Auslegung der verschiedenen Konzepte . . . . .	104





# A. Anhang

## A.1 Programmcode

Im folgenden ist die Hauptdatei der Programmierung in MATLAB aufgeführt. Weiterführende Codes und Funktionen sind der beigefügten CD zu entnehmen.

```
1 %% Autor: Mara Fuchs
2 % Datum: 23.11.2018
3 % Version 8
4 % Objektorientierte Programmierung der Kabine und der Passenger Service
5 % Unit, Untersuchung und Bewertung verschiedener Konzepte zur Anordnung
6 % der PSU-Funktionen
7
8 clear all
9 clc
10
11 %% Generieren der einzelnen Flugzeugbaugruppen als Objekte
12 addpath('functions')
13
14 %%Flugzeug erstellen
15 A320 = Flugzeug('A320',37570,35800,11760);
16 %%Flugzeug erzeugt Flügel und Heck
17 LHwing = createFluegel_(A320,'linker Flügel',15000,300,4190,'LH');
18 RHwing = createFluegel_(A320,'rechter Flügel',15000,300,4190,'RH');
19 Heck = createHeck_(A320,12450,3950,5000);
20 %%Flugzeug erzeugt Rumpf
21 Rumpf = createRumpf_(A320,1023,3960,3960);
22 %%Rumpf erzeugt Spanten,Querbalken und Sitzschienen,Seitenwände,Außenhaut
23 for i=1:75
24     eval(['Spant_',num2str(i),'=createSpant_(Rumpf,i);'])
25     eval(['Querbalken_',num2str(i),'=createQuerbalken_(Rumpf,i,FR);'])
26 end
27 for i=12:82
28     eval(['Sitzschienen_',num2str(i),'=createSitzschienen_(Rumpf,FR,i);'])
29 end
30 Seitenwand = createSeitenwand_(Rumpf,GRD.LIN.USW);
31 for i=1:160
32     eval(['Haut_',num2str(i),'=createHaut_(Rumpf,P,i);'])
33 end
34 %%Flügel erzeugt Triebwerk
35 TriebwerkLH = createTriebwerk_(LHwing,'linkes Triebwerk',1600,1600,4000,'LH');
36 TriebwerkRH = createTriebwerk_(RHwing,'linkes Triebwerk',1600,1600,4000,'RH');
37 %%Flugzeug erzeugt Kabine
38 A320_Kabine = createKabine_(A320,3590,1023,180,3,29);
39 %%Kabine erzeugt Gepäckablagen, Dadopanel/Lining,Boden
40 for h=1:length(A320_Kabine.OHSC_laenge)
41     x_startOHSC = A320_Kabine.OHSC_start(h);
42     Laenge = A320_Kabine.OHSC_laenge(h);
43     %eval(['Gepaeckablage_',num2str(h),'=createGepaeckablage_(A320_Kabine,'Gepaeckablage',
44     %eval(['GepaeckablageLH_',num2str(h),'=createGepaeckablage_(A320_Kabine,'Gepaeckablage
45     %eval(['GepaeckablageLH_',x_startOHSC,GRD.OHSC,749,367,Laenge,19+h);'])
46     eval(['Gepaeckablage_',num2str(h),'=createGepaeckablageLBIN_(A320_Kabine,'
47     GepaeckablageLBIN_',x_startOHSC,OHSCE,845.3,534,Laenge,h);'])
48 end
49 for u=1:54
50     eval(['Lining_',num2str(u),'=createLining_(A320_Kabine,'Lining',u);'])
51 end
52 Boden_Kabine = createBoden_(A320_Kabine,GRD.FP.F);
53
54 %%PSC_1 = createPSC_('PSC1',Gepaeckablage_1,11,A320_Kabine.Laenge,0); %PSC für XBin
55 PSC_1 = createPSC_('PSC1',Gepaeckablage_1,11,A320_Kabine.Laenge,3.1398); %PSC1 für LBin
56 PSC_2 = createPSC_('PSC2',Gepaeckablage_1,5.366,A320_Kabine.Laenge,11.85); %PSC1 für LBin
57
58 %% Platzierung der PSU-Funktionen
59 Luftpanel = 4; %Boxpanel für Luftventile
60 Lichtpanel = 7; %Boxpanel für Lampen
61 Lautsprecherpanel = 4; %Boxpanel für Lautsprecher und Hinweiszeichen
62 Sauerstoffpanel = 11; %Boxpanel für die Sauerstoffbox
```

```

61 max_Abstando2 = 8*A320.i2mm; %Abstand der O2-Masken max
62 min_Abstando2 = 2*A320.i2mm; %Abstand der O2-Masken min
63
64 %Kabine platziert Sitze und PSU-Elemente
65 for j=1:A320_Kabine.Anzahl_Reihen
66     x_start = A320_Kabine.Abstaeude_Reihen(j);
67     eval(['seatA_',num2str(j),'=createSitze_(A320_Kabine,''SitzA'',x_start,1010-A320_Kabine.
        Sitzbreite,''RH'');']); %1010 ist der Versatz zur rechten Seite
68     eval(['seatB_',num2str(j),'=createSitze_(A320_Kabine,''SitzB'',x_start,1010,''RH'');']);
69     eval(['seatC_',num2str(j),'=createSitze_(A320_Kabine,''SitzC'',x_start,1010+A320_Kabine.
        Sitzbreite,''RH'');']);
70     eval(['seatD_',num2str(j),'=createSitze_(A320_Kabine,''SitzD'',x_start,-1010+A320_Kabine.
        Sitzbreite,''LH'');']); %1010 ist der Versatz zur rechten Seite
71     eval(['seatE_',num2str(j),'=createSitze_(A320_Kabine,''SitzE'',x_start,-1010,''LH'');']);
72     eval(['seatF_',num2str(j),'=createSitze_(A320_Kabine,''SitzF'',x_start,-1010-A320_Kabine.
        Sitzbreite,''LH'');']);
73     %Anordnung der Sauerstoffmasken abhängig vom Bauraum unter der
74     %Bedingung, dass der Mensch diese greifen kann
75     max_Abstand_o2 = (x_start+340-max_Abstando2-155.1)*A320_Kabine.mm2i; % -246.3 %155.1
76     freier_platz = find(PSC_1.Bauraum >= max_Abstand_o2 & PSC_1.Belegung==0,1,'first');
77     hilfsvektor = zeros(length(PSC_1.Belegung),1);
78     for r=freier_platz:freier_platz+Sauerstoffpanel*2
79         if PSC_1.Belegung(r)==0
80             hilfsvektor(r,1)=0;
81         else
82             hilfsvektor(r,1)=1;
83         end
84     end
85     if sum(hilfsvektor)==0
86         x_startPSU = PSC_1.Bauraum(freier_platz+1)*A320_Kabine.i2mm;
87         eval(['o2_',num2str(j),'=createSauerstoffmasken_(PSC_1,11,11.22,2.5,x_startPSU,[1
            0 0],'o2rechts'');']);
88     else
89         freier_platz = find(hilfsvektor==1,1,'last');
90         x_startPSU = PSC_1.Bauraum(freier_platz+2)*A320_Kabine.i2mm;
91         if x_startPSU >= x_start+340-min_Abstando2-246.3
92             eval(['o2_',num2str(j),'=createSauerstoffmasken_(PSC_1,11,11.22,2.5,x_startPSU
                ,[1 0 0],'o2links'');']);
93         else
94             eval(['o2_',num2str(j),'=createSauerstoffmasken_(PSC_1,11,11.22,2.5,x_startPSU
                ,[1 0 0],'o2rechts'');']);
95         end
96     end
97     for i=freier_platz+1:Sauerstoffpanel*2+freier_platz
98         PSC_1.Belegung(i)= 1;
99     end
100 %Anordnung der weiteren Funktionen der PSU abhängig vom
101 %gewählten Konzept
102 freier_platz = find(PSC_1.Belegung==1,1,'last');
103 if PSC_1.Bauraum(freier_platz)*A320_Kabine.i2mm < x_start+340
104     hilfsvektor = zeros(length(PSC_1.Belegung),1);
105     for r=freier_platz:freier_platz+Luftpanel*2
106         if PSC_1.Belegung(r)==0
107             hilfsvektor(r,1)=0;
108         else
109             hilfsvektor(r,1)=1;
110         end
111     end
112     if sum(hilfsvektor)==0
113         x_startPSU = PSC_1.Bauraum(freier_platz+1)*A320_Kabine.i2mm;
114         eval(['BelueftungA_',num2str(j),'=createBelueftung_(PSC_1,50,50,6.35,30,
            x_startPSU,[0 0.8 1],2,3.15,7);']);
115         eval(['BelueftungB_',num2str(j),'=createBelueftung_(PSC_1,50,50,6.35,30,
            x_startPSU,[0 0.8 1],2,3.15+2.5,4);']);
116         eval(['BelueftungC_',num2str(j),'=createBelueftung_(PSC_1,50,50,6.35,30,
            x_startPSU,[0 0.8 1],2,3.15+5,0);']);
117     else
118         freier_platz = find(hilfsvektor==1,1,'last');
119         x_startPSU = PSC_1.Bauraum(freier_platz+1)*A320_Kabine.i2mm;
120         eval(['BelueftungA_',num2str(j),'=createBelueftung_(PSC_1,50,50,6.35,30,
            x_startPSU,[0 0.8 1],2,3.15,7);']);
121         eval(['BelueftungB_',num2str(j),'=createBelueftung_(PSC_1,50,50,6.35,30,
            x_startPSU,[0 0.8 1],2,3.15+2.5,4);']);
122         eval(['BelueftungC_',num2str(j),'=createBelueftung_(PSC_1,50,50,6.35,30,
            x_startPSU,[0 0.8 1],2,3.15+5,0);']);
123     end
124     if sum(hilfsvektor)==0
125         neuer_platz = find(PSC_1.Belegung==1,1,'last');
126         freier_platz = neuer_platz-Sauerstoffpanel*2-Luftpanel*2-4;
127         x_startPSU = PSC_1.Bauraum(freier_platz)*A320_Kabine.i2mm;
128         eval(['BelueftungA_',num2str(j),'=createBelueftung_(PSC_1,50,50,6.35,30,
            x_startPSU,[0 0.8 1],2,3.15,7);']);
129         eval(['BelueftungB_',num2str(j),'=createBelueftung_(PSC_1,50,50,6.35,30,
            x_startPSU,[0 0.8 1],2,3.15+2.5,4);']);
130         eval(['BelueftungC_',num2str(j),'=createBelueftung_(PSC_1,50,50,6.35,30,
            x_startPSU,[0 0.8 1],2,3.15+5,0);']);
131     end
132     for i=freier_platz+1:Luftpanel*2+freier_platz
133         PSC_1.Belegung(i)= 2;
134     end
135
136 frage = exist('PSC_2');
137 if frage ==1
138     freier_platz = find(PSC_1.Belegung==2,1,'last');
139     x_startPSU = PSC_2.Bauraum(freier_platz-Luftpanel*2-1)*A320_Kabine.i2mm;
140     eval(['Hinweiszeichen_',num2str(j),'=createHinweiszeichen_(PSC_2,25.4,5.366*A320.
        i2mm,23.44,x_startPSU,[1 0 1],0,0);']);
141     eval(['LeselichtA_',num2str(j),'=createLeselicht_(PSC_2,40,40,14.22,x_startPSU
        ,[0.8 0.9 0],2,1.2,18,4,1.2);']);

```

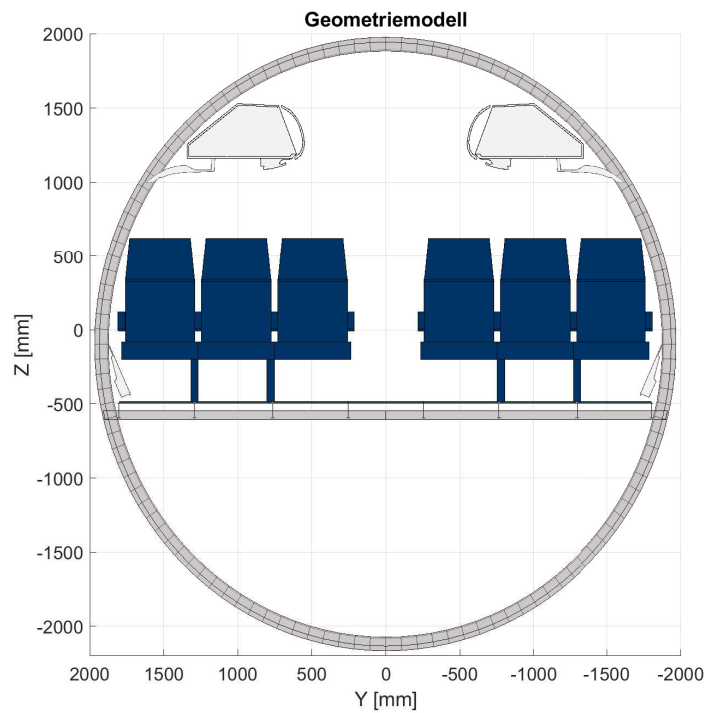
```

142     eval(['LeselichtB_', num2str(j), ']=createLeselicht_(PSC_2,40,40,14.22,x_startPSU
143     ,[0.8 0.9 0],2,1.43*2,9,4,1.43*2);']);
144     eval(['LeselichtC_', num2str(j), ']=createLeselicht_(PSC_2,40,40,14.22,x_startPSU
145     ,[0.8 0.9 0],2,1.5*3,0,4,1.5*3);']);
146     eval(['Flugbegleiterruf_', num2str(j), ']=createRufknopf_(PSC_2,22.35,22.35,14.22,
147     x_startPSU,[0.93 0.69 0.13],4,2,14);']);
148     for i=freier_platz-Luftpanel*2-1:freier_platz
149         PSC_2.Belegung(i)= 3;
150     end
151 else
152     neuer_platz = find(PSC_1.Belegung==2,1,'last');
153     max_licht_abstand = eval(['seatA_', num2str(j), '.Mittelpunkt_x']) + 90;
154     min_licht_abstand = (x_start+160)*A320.mm2i;
155     if PSC_1.Bauraum(neuer_platz) > min_licht_abstand
156         if PSC_1.Bauraum(neuer_platz+1)*A320.i2mm < max_licht_abstand
157             freier_platz = neuer_platz;
158         else
159             freier_platz = find(PSC_1.Belegung==1,1,'last')-Sauerstoffpanel*2-
160                 Lichtpanel*2-4;
161         end
162         x_startPSU = PSC_1.Bauraum(freier_platz+1)*A320_Kabine.i2mm;
163         eval(['Hinweiszeichen_', num2str(j), ']=createHinweiszeichen_(PSC_1,25.4,11*A320
164         .i2mm,23.44,x_startPSU,[1 0 1],0,0);']);
165         eval(['LeselichtA_', num2str(j), ']=createLeselicht_(PSC_1,60.96,60.96,14.22,
166         x_startPSU,[0.8 0.9 0],2.5,3.15,0,4.9,3.15);']);
167         eval(['LeselichtB_', num2str(j), ']=createLeselicht_(PSC_1,60.96,60.96,14.22,
168         x_startPSU,[0.8 0.9 0],2.5,3.15+2.5,0,4.9,3.15+2.5);']);
169         eval(['LeselichtC_', num2str(j), ']=createLeselicht_(PSC_1,60.96,60.96,14.22,
170         x_startPSU,[0.8 0.9 0],2.5,3.15+5,0,4.9,3.15+5);']);
171         eval(['Flugbegleiterruf_', num2str(j), ']=createRufknopf_(PSC_1
172         ,22.35,22.35,14.22,x_startPSU,[0.93 0.69 0.13],4.9,4.5,0);']);
173         for i=freier_platz+1:freier_platz+Lichtpanel*2
174             PSC_1.Belegung(i)= 3;
175         end
176     else
177         freier_platz = neuer_platz-Luftpanel*2-Lichtpanel*2;
178         x_startPSU = PSC_1.Bauraum(freier_platz)*A320_Kabine.i2mm;
179         eval(['Hinweiszeichen_', num2str(j), ']=createHinweiszeichen_(PSC_1,25.4,11*A320
180         .i2mm,23.44,x_startPSU,[1 0 1],0,0);']);
181         eval(['LeselichtA_', num2str(j), ']=createLeselicht_(PSC_1,60.96,60.96,14.22,
182         x_startPSU,[0.8 0.9 0],2.5,3.15,0,4.9,3.15);']);
183         eval(['LeselichtB_', num2str(j), ']=createLeselicht_(PSC_1,60.96,60.96,14.22,
184         x_startPSU,[0.8 0.9 0],2.5,3.15+2.5,0,4.9,3.15+2.5);']);
185         eval(['LeselichtC_', num2str(j), ']=createLeselicht_(PSC_1,60.96,60.96,14.22,
186         x_startPSU,[0.8 0.9 0],2.5,3.15+5,0,4.9,3.15+5);']);
187         eval(['Flugbegleiterruf_', num2str(j), ']=createRufknopf_(PSC_1
188         ,22.35,22.35,14.22,x_startPSU,[0.93 0.69 0.13],4.9,4.5,0);']);
189         for i=freier_platz:freier_platz+Lichtpanel*2
190             PSC_1.Belegung(i)= 3;
191         end
192     end
193 end
194
195 if mod(j,2)~=0
196     neuer_platz = find(PSC_1.Belegung==1,1,'last');
197     if PSC_1.Bauraum(neuer_platz)*A320_Kabine.i2mm < x_start+340
198         hilfsvektor = zeros(length(PSC_1.Belegung),1);
199         for r=neuer_platz-Lautsprecherpanel*2-Sauerstoffpanel*2+1:neuer_platz-
200             Sauerstoffpanel*2
201             if PSC_1.Belegung(r)==0
202                 hilfsvektor(r,1)=0;
203             else
204                 hilfsvektor(r,1)=1;
205             end
206         end
207         if sum(hilfsvektor)==0
208             freier_platz = neuer_platz-Sauerstoffpanel*2-Lautsprecherpanel*2+1;
209             x_startPSU = PSC_1.Bauraum(freier_platz)*A320_Kabine.i2mm;
210             eval(['Lautsprecher_', num2str(j), ']=createLautsprecher_(PSC_1
211             ,89.67,285,23.44,x_startPSU,[0.1 0.9 0.2],0,0,-15);']);
212         else
213             freier_platz = find(hilfsvektor==1,1,'first')-Lautsprecherpanel*2;
214             x_startPSU = PSC_1.Bauraum(freier_platz)*A320_Kabine.i2mm;
215             eval(['Lautsprecher_', num2str(j), ']=createLautsprecher_(PSC_1
216             ,89.67,285,23.44,x_startPSU,[0.1 0.9 0.2],0,0,-15);']);
217         end
218     else
219         freier_platz = neuer_platz+1;
220         x_startPSU = PSC_1.Bauraum(freier_platz)*A320_Kabine.i2mm;
221         eval(['Lautsprecher_', num2str(j), ']=createLautsprecher_(PSC_1,89.67,285,23.44,
222         x_startPSU,[0.1 0.9 0.2],0,0,-15);']);
223     end
224     for i=freier_platz:freier_platz+Lautsprecherpanel*2-1
225         PSC_1.Belegung(i) = 4;
226     end
227 end
228
229 % Anschluss für die digitale Versorgung erstellen
230 % if mod(j,3)==0 || j==1
231 %     Start = eval(['LeselichtB_', num2str(j), '.Mittelpunkt_x']);
232 %     eval(['Kabine_DEUA', num2str(j), '= Elektronik(''DEUA1'',100,60,60,Start,1380,1150,[0.9 0
233 %     0]);']);
234 % end
235 end

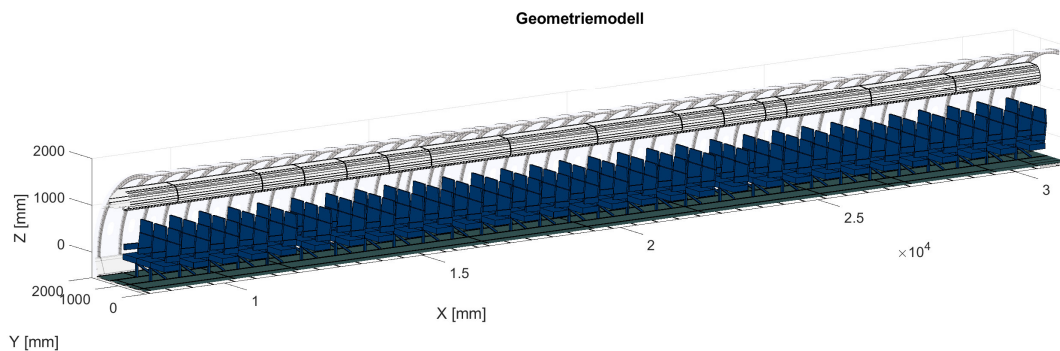
```

## A.2 Flugzeugmodell

Die Abbildungen A.1b und A.1a geben einen Einblick in die Kabine mit allen weiteren Sitzreihen sowie eine detailliertere Ansicht der Kabine. Die drei weiteren Abbildungen A.2a, A.2b und A.2c zeigen weitere Ansichten des verwendeten Geometriemodells eines Flugzeugs vom Modell A320.

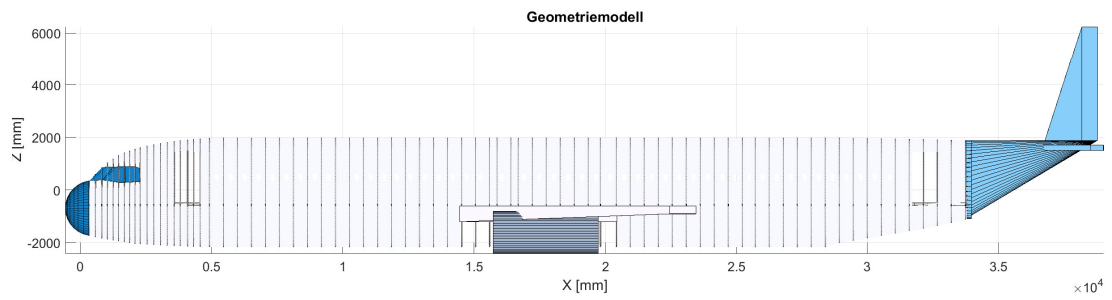


(a) Schnittansicht der Kabine mit Single Aisle Konfiguration und dem ECBin von AIRBUS

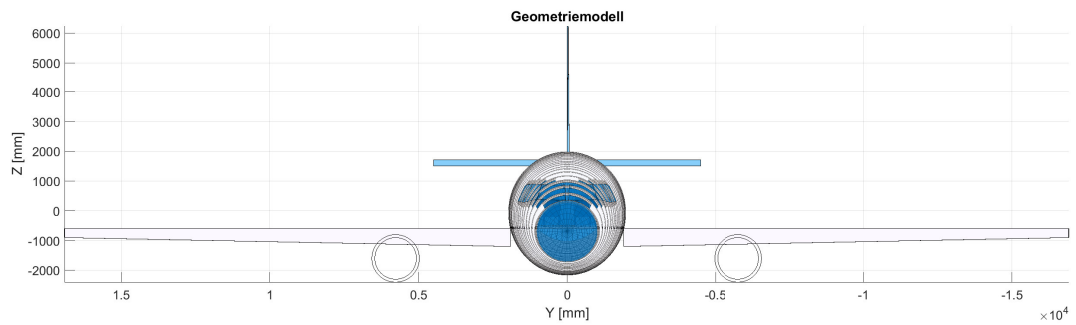


(b) Rechte Seitenansicht der Kabine in Flugrichtung mit allen Sitzreihen und dem ECBin von AIRBUS

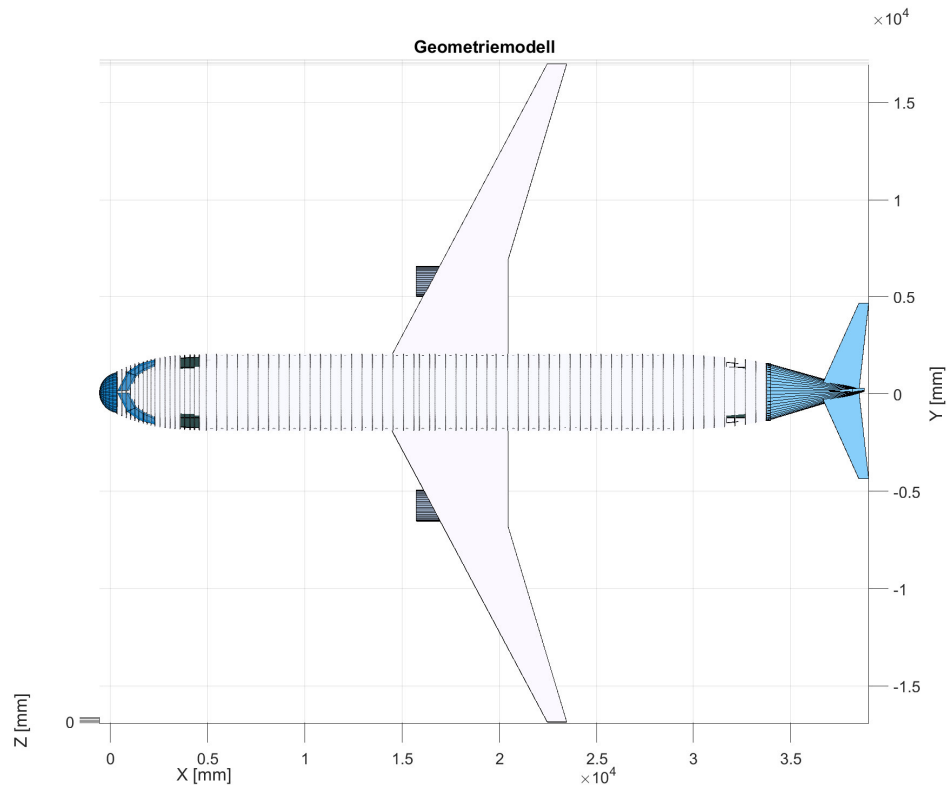
Abbildung A.1: Kabinenmodell



(a) Seitenansicht



(b) Frontalansicht



(c) Draufsicht

Abbildung A.2: Geometriemodell des Flugzeugs als Grundlage für die Betrachtung der Passagier Service Einheiten in der Kabine

### A.3 Annahmen für die Auslegung der PSU

Die Tabelle A.1 fasst die weiteren getroffenen Annahmen bei der Auslegung der PSU zusammen. Für die Werte der Lautsprecherleistung und den Verbrauch wurden die Daten von einem typischen Lautsprecher der Luftfahrt angenommen [49]. Die anderen Werte stammen aus [3].

PSU-Funktion	Bezeichnung	Wert
indiv. Belüftung	Abmaße Düse	Ø 30 mm
	max. Luftaustrittsgeschwindigkeit	1,0 m/s
Hinweiszeichen, Lautsprecher	Zeichenhöhe	18 mm
	Lautsprecher Leistung	10 Watt
	Lautsprecher Kennschalldruck	87 dB

Tabelle A.1: Annahmen für die Auslegung der verschiedenen Konzepte

Die Abbildung A.3 zeigt die Annahmen der Arbeitszeiten, die für die Berechnung der Gesamtzeit zum Einbau der PSU benötigt werden. Dabei wird die Passagier Service Einheit in drei Paneele unterteilt. Auf dem Einen befinden sich die Hinweiszeichen, der Lautsprecher, die Leselichter und der Flugbegleiterrufknopf. Die anderen sind zum einen die Sauerstoffbox mit den Masken und zum anderen die individuelle Belüftung. Die getroffenen Annahmen für die Zeiten der jeweiligen Arbeitsschritte beruht auf Erfahrungswerten.

Variablen	PSU Montage	FAL Montage IM	Vormontage IM
t <sub>T</sub>	Transport/Hinbringen	4	1
t <sub>p</sub>	Einhängen PSU	3	1
t <sub>L</sub>	Einhängen Individ. Air	3	1
t <sub>S</sub>	Einhängen O2	3	1
t <sub>a,p</sub>	Anschluss PSU	3	2,0
t <sub>a,L</sub>	Anschluss Individ. Air	4	2,0
t <sub>a,S</sub>	Anschluss O2	3,5	2,0
t <sub>f</sub>	Filler Panel anschließen	5	3
	Summe	28,5	13
N	NVA Add-On	70%	20%
	Zeit pro PSU [IM]	48,45	15,6
	Anzahl der PSUs	60	60
Z <sub>K</sub>	Gesamtzeit [h]	29,1	9,36

Abbildung A.3: Annahmen der Arbeitszeiten für den Einbau der PSU in die Kabine während Vor- und Endmontage

## A.4 Ergebnisse der geometrischen Bewertung

Als Grundlage für die Säulendiagramme dienen die Daten und Ergebnisse der jeweiligen Sitzreihen und -plätze. Die Abbildung A.4 zeigt die berechneten Werte für das Referenzmodell. Dabei sind auf der x-Achse die Sitznummern sortiert nach den Gang- (Sitz A), Mittel- (Sitz B) und den Fensterplätzen (Sitz C) aufgetragen. Auf der y-Achse ist der Abstand zum jeweiligen Messpunkt in mm angegeben. Die Datenpunkte spiegeln die Werte für die Sauerstoffmasken (blau), die indiv. Belüftung (grün), die Lichtschalter (rot), den Flugbegleiterrufknopf (gelb), die Hinweiszeichen (pink) und die Lautsprecher (hellblau) wider. Die rote Linie kennzeichnet die maximale Griffweite des 50 %-Perzentil Menschens (europäisch).

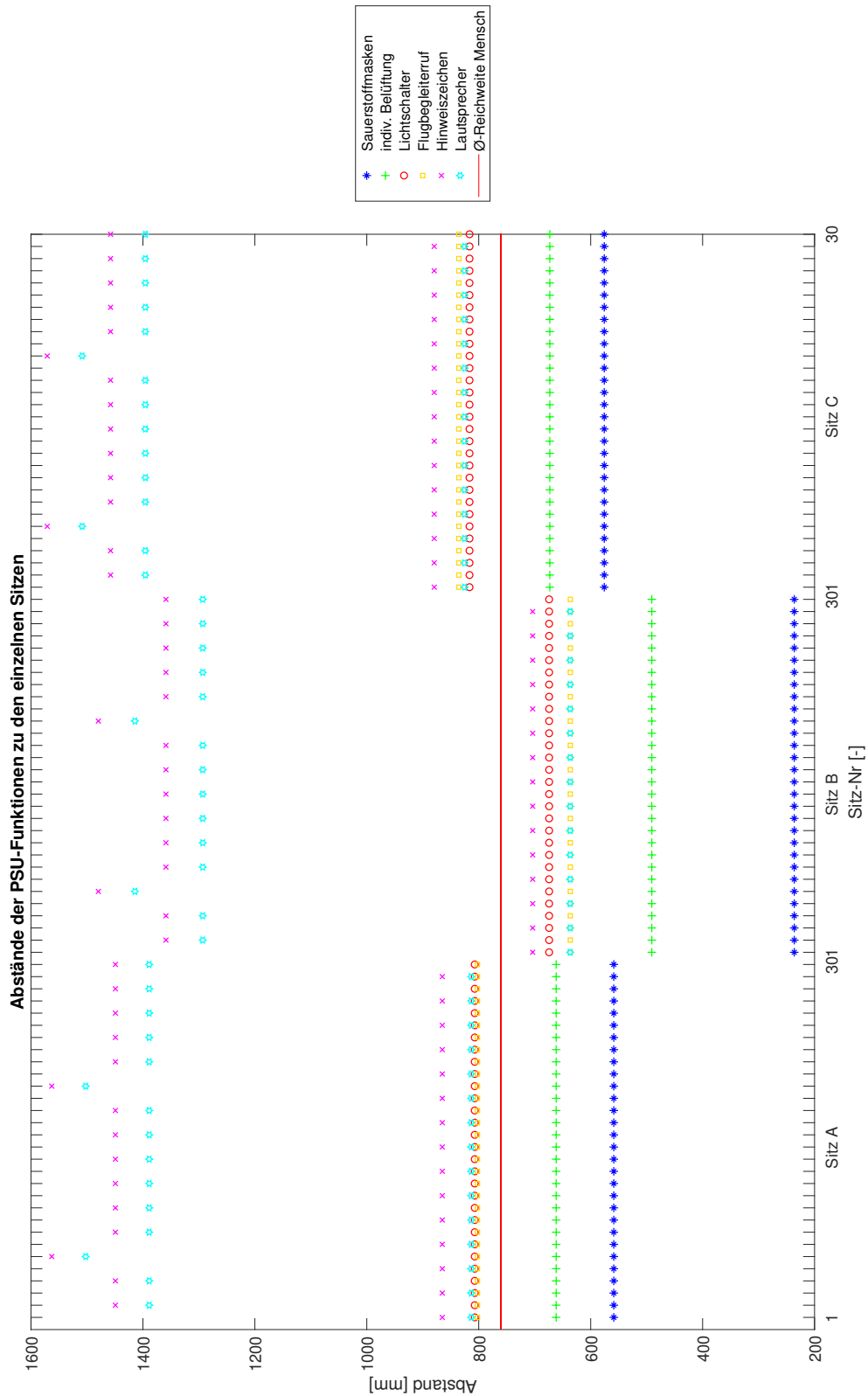
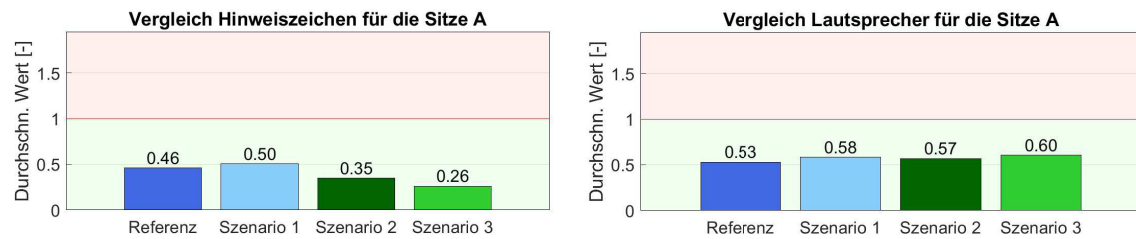


Abbildung A.4: Bewertungsmatrix mit den Ergebnissen für alle Sitze der rechten Kabinenseite, beispielhaft für das Referenzmodell dargestellt

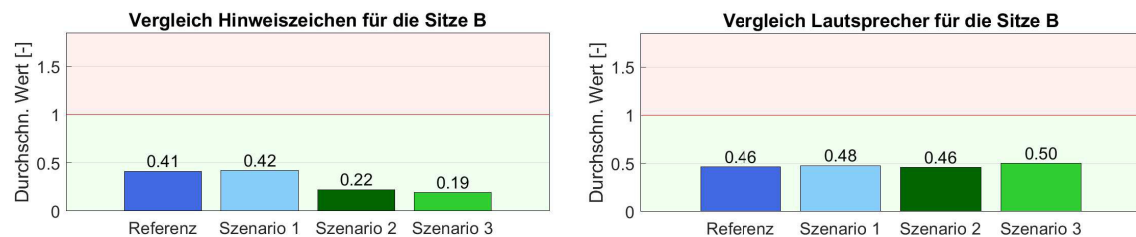
Die drei folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Zielfunktionen für die Hinweiszeichen und die Lautsprecher (A.5, A.6, A.7). Die Werte unterscheiden sich nur marginal. Die geringen Abweichungen sind auf die Maße der jeweils verwendeten



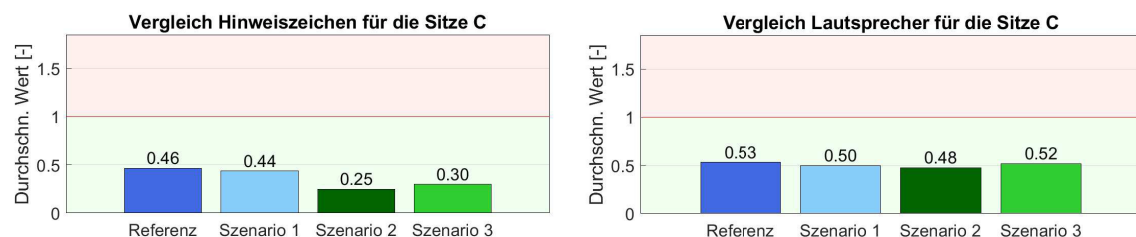
Gepäckablage zurückzuführen. Zudem spielen die Abmaße der Sauerstoffbox eine Rolle, da die Platzierung der PSU-Funktionen mit den Sauerstoffboxen beginnt und damit den noch zur Verfügung stehenden Bauraum definiert.



Abbildungung A.5: Vergleich der Hinweiszeichen und Lautsprecher für den Sitz A bei allen Szenarien



Abbildungung A.6: Vergleich der Hinweiszeichen und Lautsprecher für den Sitz B bei allen Szenarien



Abbildungung A.7: Vergleich der Hinweiszeichen und Lautsprecher für den Sitz C bei allen Szenarien

## A.5 Funktionalitätenmodell

Wie bereits in Kapitel 6.3 aufgeführt, erzeugt die Programmierung für jedes Kabinenszenario grafische Modelle in denen die verschiedenen Wechselwirkungen und Anschlüsse dargestellt werden. Die zwei Abbildungen A.8 und A.9 zeigen beispielhaft für das Szenario 2 die haptische sowie die visuelle und akustische Interaktion mit dem Passagier.

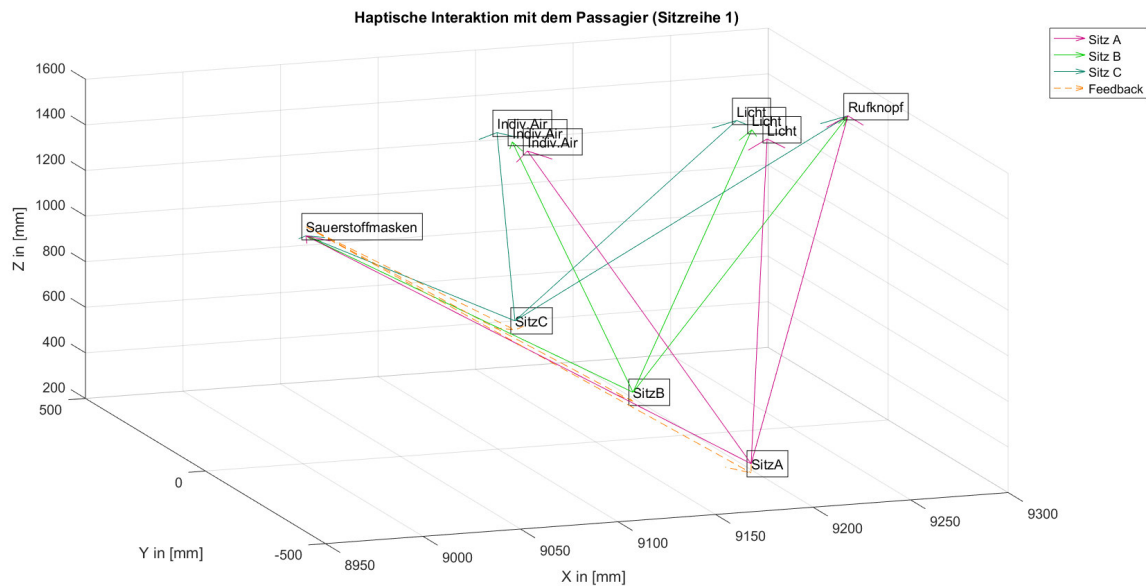


Abbildung A.8: Darstellung der haptischen Interaktion zwischen Passagier und den Funktionen der PSU, beispielhaft für eine Sitzreihe dargestellt

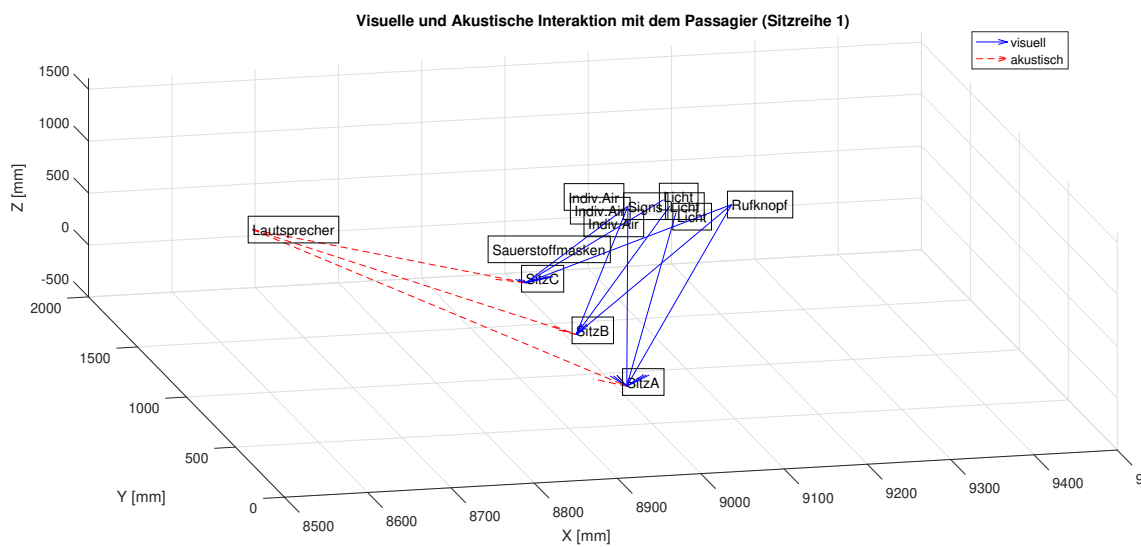


Abbildung A.9: Funktionalitätenmodell am Beispiel von Szenario 2 für die visuelle und akustische Interaktion